

**Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Eléctrica**

Metodología para el reemplazo de motores de corriente continua por motores de inducción trifásicos con variadores de velocidad en extrusoras de plástico

**Por:
Kabir Gabriel Bonilla Vega**

**Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
Julio de 2021**

Metodología para el reemplazo de motores de corriente continua por motores de inducción trifásicos con variadores de velocidad en extrusoras de plástico

**Por:
Kabir Gabriel Bonilla Vega**

Sometido a la Escuela de Ingeniería Eléctrica
de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad de Costa Rica
como requisito parcial para optar por el grado de:

LICENCIADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Aprobado por el Tribunal:

Inga. Mercedes Chacón Vásquez, Dra.
Representante del director, Escuela de Ingeniería Eléctrica

Ing. Oscar Núñez Mata, Dr.
Director, Comité Asesor

Ing. Mauricio Espinoza Bolaños, Dr.
Miembro, Comité Asesor

Ing. Eduardo Suárez Hernández, Lic.
Miembro, Comité Asesor

Ing. Víctor Hugo Granados Fernández, Dr.
Miembro del Tribunal

DEDICATORIA

En primer lugar, me gustaría dedicar este trabajo a mi madre, que ha sido la mujer que me ha apoyado durante todos estos años de formación universitaria, y gracias a ella es que hoy puedo presentar este proyecto de graduación como culminación de un ciclo de formación académica.

En segundo lugar, me gustaría dedicar este trabajo a mis profesores de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de los cuales he aprendido bastante y más allá del conocimiento técnico que me han aportado durante todos estos años, considero que me han enseñado algunos aspectos fundamentales de la vida que espero aplicar en mis futuros años de ejercicio profesional.

En tercer lugar, quisiera dedicarlo a mis compañeros de la carrera, especialmente a Manuel, Miguel, Alonso, Olger y Alberto ya que a través de ellos aprendí lecciones bastante valiosas, como el compañerismo, la perseverancia y el trabajo en equipo, entre muchos otros, y con quienes compartí momentos tanto amenos como complicados, pero que al final se pudieron superar de manera satisfactoria. Y a mis amigos Eduardo y Keylor, que me aportaron la motivación necesaria para iniciar y concluir esta etapa de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-------------|
| ÍNDICE GENERAL | iv |
| ÍNDICE DE FIGURAS | vii |
| ÍNDICE DE TABLAS | xi |
| NOMENCLATURA | xii |
| RESUMEN | xvii |
| CAPÍTULO 1: Introducción | 1 |
| 1.1 Justificación | 1 |
| 1.2 Planteamiento del problema..... | 2 |
| 1.3 Objetivos | 3 |
| 1.3.1 Objetivo general..... | 3 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 3 |
| 1.4 Metodología | 3 |
| 1.5 Alcance | 4 |
| 1.6 Procedimiento de evaluación | 5 |
| CAPÍTULO 2: Desarrollo teórico | 6 |
| 2.1 Aspectos generales de los motores eléctricos | 6 |
| 2.1.1 Motores de corriente continua | 6 |
| 2.1.2 Motores de inducción trifásicos de jaula de ardilla | 9 |
| 2.1.3 Comparación entre los motores de CC y los motores de CA | 10 |
| 2.1.4 Estándares de pruebas para motores eléctricos..... | 13 |
| 2.1.5 Eficiencias de los motores eléctricos | 19 |
| 2.1.6 Modelado térmico de los motores eléctricos | 22 |
| 2.2 Circuitos de control de motores de CC y CA | 23 |
| 2.2.1 Circuitos para el control de motores CC..... | 24 |
| 2.2.2 Circuitos para el control de motores de CA: Variadores de velocidad..... | 25 |
| 2.3 Control de velocidad de los motores eléctricos | 29 |
| 2.3.1 Control de la máquina de corriente continua | 29 |
| 2.3.2 Control vectorial indirecto con encoder..... | 33 |
| 2.3.3 Control V/Hz sensorless | 39 |
| 2.3.4 Comparación entre los métodos de control de motores..... | 40 |
| 2.4 Tipos de cargas mecánicas..... | 41 |
| 2.4.1 Cargas de par constante | 41 |
| 2.4.2 Cargas de par variable..... | 45 |
| 2.5 Aspectos eléctricos y mecánicos durante los reemplazos..... | 46 |
| 2.5.1 Aspectos Eléctricos | 46 |

| | |
|---|------------|
| 2.5.2 Aspectos Mecánicos | 49 |
| 2.6 Motores para uso con variador electrónico..... | 61 |
| CAPÍTULO 3: Propuesta metodológica | 64 |
| CAPÍTULO 4: Desarrollo de la metodología | 71 |
| 4.1 Simulación del sistema extrusor de plástico con motor CC | 71 |
| 4.2 Simulaciones de los sistemas de CA..... | 79 |
| 4.2.1 Motor CA de 10 hp | 80 |
| 4.2.2 Motor CA de 5 hp | 96 |
| 4.2.3 Motor CA de 20 hp | 109 |
| CAPÍTULO 5: Análisis de resultados y validación de la propuesta metodológica | 121 |
| 5.1 Análisis de los resultados de desempeño y temperatura..... | 121 |
| 5.2 Análisis de los resultados de las pruebas de control..... | 124 |
| 5.3 Validación de la propuesta metodológica..... | 130 |
| CAPÍTULO 6: Conclusiones y recomendaciones | 132 |
| 6.1 Conclusiones | 132 |
| 6.2 Recomendaciones | 133 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 134 |
| APÉNDICES..... | 139 |
| AP.1 Resultados pruebas de eficiencia Motor CC MATLAB® con resistencia serie..... | 140 |
| AP.2 Resultados pruebas de eficiencia motor CC MATLAB® sin resistencia serie | 141 |
| AP.3 Resultados pruebas de eficiencia motor CA 10 hp MATLAB® | 142 |
| AP.4 Resultados pruebas de eficiencia Motor CA 5 hp MATLAB®..... | 143 |
| AP.5 Resultados pruebas de eficiencia motor CA 20 hp MATLAB® | 144 |
| AP.6 Datos de desempeño motor 10 hp ABB | 145 |
| AP.7 Datos de desempeño motor 5 hp ABB | 146 |
| AP.8 Datos de desempeño motor 20 hp ABB | 147 |
| AP.9 Esquemático utilizado para las pruebas de eficiencia del sistema CC (generado con Simulink®) | 148 |
| AP.10 Esquemático utilizado para las pruebas de control del sistema Extrusora de Plástico con motor CC (generado con Simulink®)..... | 149 |
| AP.11 Esquemático típico utilizado para las pruebas de eficiencia para los motores de CA (generado con Simulink®)..... | 150 |
| AP.12 Esquemático típico utilizado para las pruebas de control vectorial indirecto de los motores CA operando la extrusora de plástico (generado con Simulink®) | 151 |
| AP.13 Esquemático típico utilizado para las pruebas de control escalar de los motores CA operando la extrusora de plástico (generado con Simulink®)..... | 152 |
| AP.14 Código de MATLAB® utilizado para generar la curva térmica del motor CC | 153 |

| | |
|--|------------|
| AP.15 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas térmicas de los motores CA | 154 |
| AP.16 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas de control del motor CC156 | |
| AP.17 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas de control del motor CA de 10 hp con control vectorial indirecto | 158 |
| AP.18 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas de control del motor CA de 10 hp con control V/Hz..... | 162 |
| AP.19 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas de control del motor CA de 5 hp con control vectorial indirecto | 165 |
| AP.20 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas de control del motor CA de 5 hp con control V/Hz..... | 169 |
| AP.21 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas de control del motor CA de 20 hp con control vectorial indirecto | 172 |
| AP.22 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas de control del motor CA de 20 hp con control V/Hz..... | 176 |
| ANEXOS | 179 |
| AN.1 Tipos de acoples mecánicos | 179 |
| AN.2 Encerramientos para motores eléctricos | 184 |
| AN.3 Montajes y posición del motor | 187 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: Esquemático de motor de CC con excitación en serie (izquierda) y excitación en derivación (derecha) (Hughes, 2006)..... | 7 |
| Figura 2.2: Diagrama de conexión del motor CC de excitación independiente y su curva par-velocidad (Sen, 1997)..... | 7 |
| Figura 2.3: Esquema del motor CC en serie y su curva par-velocidad (Barnes, 2003). | 8 |
| Figura 2.4: Esquemático del motor CC compuesto y su curva par velocidad (Barnes, 2003). | 9 |
| Figura 2.5: Circuito equivalente por fase de un motor de inducción trifásico con el rotor reflejado en el estator (Hughes, 2006). | 9 |
| Figura 2.6: Indicadores de desempeño de motores CC y CA (Melfi, 1993). | 11 |
| Figura 2.7: Comportamiento del torque y la potencia con respecto a la velocidad para motores de CC (Melfi, 1993). | 11 |
| Figura 2.8: Flujo de potencia en el motor de corriente continua (Chapman, 2012) | 15 |
| Figura 2.9: Comparación entre los estándares de eficiencia IEC y el estándar NEMA (Collins, 2020). | 21 |
| Figura 2.10: Umbrales de eficiencia mínimos para motores de 60 Hz, para un rango de potencias entre 1 hp hasta 500 hp, según la cantidad de polos y el encerramiento (Boteler, 2013). | 21 |
| Figura 2.11: Topología de convertidor CC-CC tipo “puente H” (Rashid, 2011). | 24 |
| Figura 2.12: Diagrama esquemático para un controlador de velocidad con retroalimentación de corriente y velocidad (Hughes, 2006). | 25 |
| Figura 2.13: Topología de un variador de frecuencias (Anónimo, 2019)..... | 26 |
| Figura 2.14: Rectificador trifásico no controlado (Rashid, 2011). | 26 |
| Figura 2.15: Formas de onda de entrada (arriba) y salida (abajo) del rectificador trifásico (Rashid, 2011)..... | 27 |
| Figura 2.16: Topología de un inversor trifásico de fuente de tensión (Rashid, 2011)..... | 27 |
| Figura 2.17: Variación de la curva par-velocidad de un motor de corriente alterna por efecto del variador de velocidad (Rockwell Automation, 2011)..... | 28 |
| Figura 2.18: Esquema de control en cascada utilizado para controlar al motor CC..... | 29 |
| Figura 2.19: Esquema de control utilizado para el diseño del variador vectorial..... | 35 |
| Figura 2.20: Sintonización de controlador por el método del LGR. Generada con MATLAB®..... | 38 |
| Figura 2.21 Curvas de potencia y par con respecto a la velocidad para una carga de par constante (Rockwell, 2001). | 42 |
| Figura 2.22: Extrusora simple (Dynisco, s.f.)..... | 43 |
| Figura 2.23: Extrusora gemela o de tornillos gemelos (Dynisco, 2011). | 44 |
| Figura 2.24: Curva par-velocidad de una extrusora, según el tipo de polímero que procesa (Das, 2008)..... | 45 |
| Figura 2.25: Curvas de par y potencia para una carga de par variable (Rockwell Automation, 2001). | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.26: Tipos de desacoples entre ejes (Bonanomi, 2015) | 51 |
| Figura 2.27: Pulso PWM con onda de tensión reflejada (Collins, 2016) | 62 |
| Figura 3.1: Diagrama de flujo del primer paso de la metodología. | 65 |
| Figura 3.2: Diagrama de flujo del segundo paso de la metodología..... | 66 |
| Figura 3.3: Diagrama de flujo del tercer paso de la metodología..... | 67 |
| Figura 3.4: Diagrama de flujo del cuarto paso de la metodología propuesta. | 68 |
| Figura 3.5: Diagrama de flujo del quinto paso de la metodología propuesta. | 70 |
| Figura 4.1: Curva de eficiencia para el motor CC operando con y sin el devanado serie en la armadura. Generado con Excel. | 72 |
| Figura 4.2 Curva par velocidad para el motor CC para operación con y sin resistencia serie. Generada con Excel. | 73 |
| Figura 4.3 Curva de corriente de armadura en función del par aplicado para el motor CC. Generada con Excel. | 74 |
| Figura 4.4 Curva de temperatura del motor CC con respecto al tiempo. Generada con MATLAB®..... | 75 |
| Figura 4.5 Velocidad rotacional del motor CC en función del tiempo. Generada con MATLAB®..... | 77 |
| Figura 4.6 Torque desarrollado por la máquina y par de carga en función del tiempo. Generada con MATLAB®. | 77 |
| Figura 4.7 Corriente de armadura deseada y su valor medido en función del tiempo. Generada con MATLAB®. | 78 |
| Figura 4.8 Tensión de armadura del motor CC medida con respecto al tiempo. Generada con MATLAB®..... | 79 |
| Figura 4.9 Curva de eficiencia con respecto a la carga nominal para motor CA de 10 hp. Generada con Excel. | 82 |
| Figura 4.10 Curva de factor de potencia en función de la carga nominal, motor CA 10 hp. Generada con Excel. | 82 |
| Figura 4.11 Curva par-velocidad para motor CA de 10 hp de MATLAB®. Generada con Excel. | 83 |
| Figura 4.12 Curva corriente-par del motor CA de 10 hp. Generada con Excel..... | 84 |
| Figura 4.13 Comportamiento térmico del motor CA de 10 hp con la extrusora. Generada con MATLAB®..... | 85 |
| Figura 4.14 Curva de velocidad rotacional en función del tiempo para motor CA de 10 hp. Generada con MATLAB®. | 88 |
| Figura 4.15 Par desarrollado por el motor CA de 10 hp y la consigna de par, en función del tiempo. Generada con MATLAB®. | 88 |
| Figura 4.16 Formas de onda medidas y deseadas para la tensión de estator del motor CA de 10 hp. Generadas con MATLAB®..... | 89 |
| Figura 4.17 Corrientes de estator del motor CA de 10 hp. Valores deseados y medidos. Generados con MATLAB®..... | 90 |
| Figura 4.18 Corriente de eje directo medida y su valor deseado para el motor CA de 10 hp. Generada con MATLAB®. | 91 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.19 Valores deseado y medido para la corriente de eje de cuadratura del motor CA de 10 hp. Generados con MATLAB®..... | 91 |
| Figura 4.20 Tensiones dq del motor CA de 10 hp. Valores deseados. Generados con MATLAB®..... | 92 |
| Figura 4.21: Velocidad rotacional medida y la consigna de frecuencia, convertida en rpm, para el motor CA de 10 hp con control V/Hz. Generada con MATLAB®..... | 93 |
| Figura 4.22: Par de carga y par desarrollado por el motor CA de 10 hp con control V/Hz. Generado con MATLAB®..... | 94 |
| Figura 4.23: Tensiones deseadas y medidas para el estator del motor CA de 10 hp con control V/Hz. Generadas con MATLAB®..... | 95 |
| Figura 4.24: Corrientes de estator medidas para el motor CA de 10 hp con control V/Hz. Generadas con MATLAB®..... | 95 |
| Figura 4.25: Curva de eficiencia contra carga nominal, motor CA de 5 hp. Generada con Excel..... | 97 |
| Figura 4.26: Curva par-velocidad para el motor CA de 5 hp. Generada con Excel..... | 98 |
| Figura 4.27: Factor de potencia en función de la carga del motor. Generada con Excel..... | 98 |
| Figura 4.28: Curva de corriente de estator con respecto a la carga aplicada al motor de 5 hp. Generada con Excel..... | 99 |
| Figura 4.29: Temperatura del motor CA de 5 hp en función del tiempo. Generada con MATLAB®..... | 100 |
| Figura 4.30: Velocidad rotacional del motor CA de 5 hp. Valores deseado y medido. Generados con MATLAB®..... | 102 |
| Figura 4.31: Par de carga y par desarrollado por el motor CA de 5 hp. Generada con MATLAB®..... | 102 |
| Figura 4.32: Tensiones ABC para el motor CA de 5 hp. Valores deseados y medidos. Generadas con MATLAB®..... | 103 |
| Figura 4.33: Corrientes de estator para el motor CA de 5 hp. Valores deseados y medidos. Generados con MATLAB®..... | 103 |
| Figura 4.34: Corriente de eje directo medida para el motor CA de 5 hp y su valor deseado. Generadas con MATLAB®..... | 104 |
| Figura 4.35: Corriente de eje cuadratura para el motor CA de 5 hp. Valores deseado y medido. Generados con MATLAB®..... | 105 |
| Figura 4.36: Tensiones de los ejes directo y cuadratura. Salidas de los controladores de corrientes dq. Generadas con MATLAB®..... | 105 |
| Figura 4.37: Velocidad rotacional medida y su valor deseado. Motor CA de 5 hp operando con control V/Hz. Generada con MATLAB®..... | 106 |
| Figura 4.38: Par de carga y par desarrollado por el motor CA de 5 hp al operar con control V/Hz. Generada con MATLAB®..... | 107 |
| Figura 4.39: Tensiones deseadas y medidas para el motor CA de 5 hp operando con control V/Hz. Generadas con MATLAB®..... | 108 |
| Figura 4.40: Corrientes de estator para el motor CA de 5 hp con control V/Hz. Generadas con MATLAB®..... | 108 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.41: Curva de eficiencia en función de la carga nominal para motor CA de 20 hp. Generada con Excel. | 110 |
| Figura 4.42: Curva par velocidad para motor CA de 20 hp. Generada con Excel. | 110 |
| Figura 4.43: Curva factor de potencia para motor CA de 20 hp en función de la carga aplicada. Generada con Excel. | 111 |
| Figura 4.44: Curva de corriente de estator como función de la carga aplicada al motor CA de 20 hp. Generada con Excel. | 112 |
| Figura 4.45: Curva de temperatura del motor CA de 20 hp con respecto al tiempo. Generada con MATLAB®. | 112 |
| Figura 4.46: Velocidad rotacional medida y consigna de velocidad para el motor CA de 20 hp. Generada con MATLAB®. | 114 |
| Figura 4.47: Par desarrollado por el motor CA de 20 hp y par de carga aplicado al motor. Generados con MATLAB®. | 114 |
| Figura 4.48: Tensiones ABC medidas a la salida del inversor y sus correspondientes valores deseados. Generadas con MATLAB®. | 115 |
| Figura 4.49: Corrientes del sistema ABC para el motor CA de 20 hp. Valores deseados y medidos. Generadas con MATLAB®. | 116 |
| Figura 4.50: Corriente eje directo, valores deseado y medido, motor CA de 20 hp. Generada con MATLAB®. | 117 |
| Figura 4.51: Corriente de eje de cuadratura para el motor CA de 20 hp. Valores deseado y medido. Generada con MATLAB®. | 117 |
| Figura 4.52: Tensiones deseadas de los ejes directo y cuadratura para el motor CA de 20 hp. Generadas con MATLAB®. | 118 |
| Figura 4.53: Velocidad rotacional medida para el motor CA de 20 hp con control V/Hz, y su valor deseado. Generada con MATLAB®. | 118 |
| Figura 4.54: Par desarrollado por el motor CA de 20 hp al operar con control V/Hz y el par de carga aplicado al motor. Generados con MATLAB®. | 119 |
| Figura 4.55: Tensiones deseadas y medidas para el motor CA de 20 hp al operar con control V/Hz. Generadas con MATLAB®. | 120 |
| Figura 4.56: Corrientes de estator medidas para el motor CA de 20 hp operando con control V/Hz. Generadas con MATLAB®. | 120 |
| Figura AN.1: Acople de boquilla o “jaw” (Holtz, s.f.)..... | 179 |
| Figura AN.2: Acople de manguito (“sleeve”) (Holtz, s.f.)..... | 180 |
| Figura AN.3: Acople de llanta (Holtz, s.f.) | 180 |
| Figura AN.4: Acople de disco (Holtz, s.f.)..... | 181 |
| Figura AN.5: Acople de diafragma (Holtz, s.f.) | 181 |
| Figura AN.6: Acople de engranajes (Holtz, s.f.) | 182 |
| Figura AN.7: Acople de rejilla (Holtz, s.f.)..... | 183 |
| Figura AN.8: Acople de cadena (Holtz, s.f.) | 183 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 2.1: Eficiencias típicas para motores CC de distintas capacidades nominales (Electrical Academia, s.f.). | 22 |
| Tabla 2.2: Comparación de las tecnologías de control empleadas en motores de CC y CA (Rockwell Automation, 2001). | 41 |
| Tabla 2.3: Tolerancias para alineación de ejes para ejes acoplados directamente (Dpto. de Energía de EUA, 2012). | 52 |
| Tabla 2.4: Detalles de los grados de protección contra sólidos según el estándar IEC-60529 (Drives and Automation, s.f.). | 54 |
| Tabla 2.5: Detalles de los grados de protección contra líquidos según el estándar IEC- 60529 (Drives and Automation, s.f.). | 54 |
| Tabla 2.6: Características de los principales tipos de aislamientos térmicos utilizados en motores eléctricos (Mazziotta, 2020). | 58 |
| Tabla 4.1: Especificaciones técnicas del motor CC. | 71 |
| Tabla 4.2 Parámetros de los controladores PI para el sistema de control en CC. | 76 |
| Tabla 4.3 Parámetros del motor CA de 10 hp. | 80 |
| Tabla 4.4: Parámetros del motor CA de 5 hp. | 96 |
| Tabla 4.5: Parámetros del motor CA de 20 hp | 109 |
| Tabla 5.1: Resultados obtenidos para los motores durante las pruebas de desempeño y temperatura | 122 |
| Tabla AN.1: Encerramiento típicos para motores de CC y CA, según el estándar NEMA (Edvard, 2013). | 184 |

NOMENCLATURA

θ_e Ángulo eléctrico de referencia para la transformada de Park

S_d Área de ventilación de un motor eléctrico

hp Caballos de fuerza, potencia de un motor eléctrico.

V_{CE} Caída de tensión en las escobillas del conmutador del motor CC

c Calor específico de un cuerpo o material.

p Cantidad de pares de polos en un motor eléctrico

ζ Coeficiente de amortiguamiento de un sistema de segundo orden

σ Coeficiente de dispersión de un motor CA.

B Coeficiente de fricción viscosa de un motor eléctrico.

K_d Coeficiente de ventilación de un motor eléctrico

$T_{c, e}$ Constante de tiempo a lazo cerrado para un sistema eléctrico de primer orden

$T_{c, m}$ Constante de tiempo a lazo cerrado para un sistema mecánico de primer orden

k_t Constante de torque de un motor eléctrico.

CA Corriente alterna

CC Corriente continua

I_A Corriente de armadura del motor CC.

$I_{a, lt}$ Corriente de la fase a del estator del motor CA en la prueba con carga

$I_{b, lt}$ Corriente de la fase b del estator del motor CA en la prueba con carga

$I_{c, lt}$ Corriente de la fase c del estator del motor CA en la prueba con carga

$I_{a, nl}$ Corriente de la fase a del estator del motor CA en la prueba sin carga

$I_{b, nl}$ Corriente de la fase b del estator del motor CA en la prueba sin carga

$I_{c, nl}$ Corriente de la fase c del estator del motor CA en la prueba sin carga
 I_{sq} Corriente del eje de cuadratura del estator del motor CA
 I_{sd} Corriente del eje directo del estator del motor CA
 $I_{avg, lt}$ Corriente promedio del motor CA en la prueba con carga
 $I_{avg, nl}$ Corriente promedio del motor CA en la prueba sin carga
 s_{lt} Deslizamiento del motor CA obtenido para la prueba con carga
 ϕ Diferencia angular entre los fasores de tensión y corriente para el motor CA
 η Eficiencia
 K_p Ganancia proporcional de un controlador PI
 $f.p.$ Factor de potencia del motor CA obtenido para las pruebas con carga
 FP Factor de servicio de un motor eléctrico
 ψ_{rd} Flujo de campo magnético concatenado en el rotor en el eje directo del motor CA
 ω_e Frecuencia angular eléctrica aplicada al motor CA
 $f_{c, e}$ Frecuencia de corte para un sistema eléctrico a lazo cerrado
 $f_{c, m}$ Frecuencia de corte para un sistema mecánico a lazo cerrado
 s Frecuencia compleja o de Laplace
 f_{lt} Frecuencia eléctrica aplicada al motor CA en la prueba con carga
 L_e Función de transferencia a lazo abierto para un sistema eléctrico
 C_e Función de transferencia controlador para planta eléctrica de un motor eléctrico
 C_m Función de transferencia controlador para planta mecánica de un motor eléctrico
 $M_{yr, e}$ Función de transferencia objetivo a lazo cerrado para un sistema eléctrico
 $M_{yr, m}$ Función de transferencia objetivo a lazo cerrado para un sistema mecánico

P_e Función de transferencia planta eléctrica del motor CC.

$P_{e, q}$ Función de transferencia planta eléctrica en el eje de cuadratura del motor CA.

$P_{e, d}$ Función de transferencia planta eléctrica en el eje directo del motor CA.

L_a Inductancia de armadura del motor CC.

L_{ls} Inductancia de dispersión del estator del motor CA.

L_{lr} Inductancia de dispersión del rotor del motor CA.

L_s Inductancia del estator del motor CA.

L_r Inductancia del rotor del motor CA.

L_0 Inductancia mutua estator rotor del motor CA.

J Inercia rotacional de un motor eléctrico

i Número de muestra de una prueba de eficiencia para el motor CA.

τ_{lt} Par de salida del motor CA en la prueba con carga.

P Pérdidas de potencia en un motor eléctrico

$P_{res, lt}$ Pérdidas misceláneas o residuales del motor CA en la prueba con carga

G Peso activo de un material en un motor eléctrico

P_{in} Potencia de entrada al motor CC.

$P_{in, lt}$ Potencia de entrada al motor CA en la prueba con carga.

$P_{in, nl}$ Potencia de entrada al motor CA en la prueba sin carga.

P_{out} Potencia de salida del motor CC.

$P_{out, lt}$ Potencia de salida del motor CA.

$P_{out, corr lt}$ Potencia de salida corregida del motor CA.

$P_{sta, nl}$ Potencia disipada en el estator del motor CA en la prueba sin carga

$P_{sta, lt}$ Potencia disipada en el estator del motor CA en la prueba con carga

$P_{core-, nl}$ Potencia disipada en el núcleo del motor CA en la prueba sin carga

$P_{rot-, lt}$ Potencia disipada en el rotor del motor CA en la prueba con carga

$P_{fricc, nl}$ Potencia disipada por ventilamiento y fricción del motor CA prueba sin carga

P_a Potencia disipada en la resistencia de armadura del motor CC.

P_{CE} Potencia disipada en las escobillas del conmutador del motor CC

R_a Resistencia de armadura del motor CC.

R_s Resistencia de estator del motor CA.

R_r Resistencia de rotor del motor CA

rpm Revoluciones por minuto

T Temperatura de un motor eléctrico en función del tiempo.

T_{amb} Temperatura ambiente.

V_A Tensión de armadura del motor CC.

$V_{a, lt}$ Tensión de la fase a del motor CA para la prueba con carga

$V_{b, lt}$ Tensión de la fase b del motor CA para la prueba con carga.

$V_{c, lt}$ Tensión de la fase c del motor CA para la prueba con carga

V_{sq} Tensión del eje de cuadratura del estator del motor CA.

V_{sd} Tensión del eje directo del estator del motor CA.

$V_{avg, lt}$ Tensión promedio aplicada al motor CA para la prueba con carga

$V_{cor, lt}$ Tensión promedio corregida aplicada al motor CA para la prueba con carga

t Tiempo, medido en segundos.

T_i Tiempo integral del controlador PI

- τ_L Torque de carga aplicado a un motor eléctrico
- τ_e Torque electromecánico desarrollado por un motor eléctrico
- X Variable neutra
- X^* Valor deseado o consigna de una variable particular
- n_r Velocidad del rotor del motor CA en la prueba con carga.
- ω Velocidad rotacional de un motor eléctrico.
- n_s Velocidad sincrónica del motor CA en la prueba con carga.

RESUMEN

El trabajo que se realizó tuvo por objetivo general proponer una metodología que permita reemplazar de forma sistemática un motor CC por un motor CA con un variador de velocidad en una aplicación industrial real, que para este trabajo se escogió una extrusora de plástico.

Para este fin, se realizaron pruebas de simulación que permitieran recolectar información relevante sobre los motores, tanto el motor CC actual como los motores CA que podrían ser candidatos para reemplazar al motor CC. Las pruebas de simulación se clasificaron en tres categorías: pruebas de desempeño, pruebas de control y comportamiento térmico.

Las variables que se midieron con las pruebas de desempeño fueron principalmente la eficiencia que mostraba cada motor, la velocidad con la que operaran la extrusora, y el factor de potencia para el caso de los motores CA. En el caso de las pruebas de control, las variables a medir fueron la velocidad rotacional, el par entregado por los motores, la corriente y la tensión de armadura para el motor CC y las corrientes y tensiones en las tres fases para el motor CA. Y el comportamiento térmico se utilizó para observar el aumento de temperatura que presentó cada motor al operar la extrusora.

El proyecto se centró en estudiar los motores CC de excitación independiente cuando se controlan con técnicas de control clásico, mientras que para los motores CA, se escogieron motores de inducción trifásicos de jaula de ardilla, cuando son controlados tanto por la metodología de control vectorial indirecto con encoder, como control escalar a lazo abierto, también conocido como control V/Hz sensorless. Y se debe mencionar que este proyecto consistió en una evaluación técnica únicamente, por lo que no medió ningún aspecto económico.

Al finalizar se concluyó que la metodología propuesta es exitosa, los sustentos quedaron probados y aunque fue un proyecto de sólo simulación, igualmente los resultados tienen validez. Asimismo, como trabajos futuros, se recomienda realizar estas pruebas en un laboratorio con equipos reales, incluyendo un hardware de procesamiento para obtener mediciones adecuadas, e incluir otros aspectos eléctricos y mecánicos que también puedan ser relevantes en una aplicación con equipos reales.

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Justificación

Los motores de corriente continua han tenido un gran éxito en la industria, debido a la simplicidad con la que se realiza el control de la velocidad y del torque entregado por estas máquinas. Lo anterior las convirtió en herramientas sumamente prácticas para uso en la industria como los molinos de papel, la industria alimenticia y la producción de plásticos. Sin embargo, presentan inconvenientes, especialmente en las escobillas, lo que provoca que deban someterse constantemente a mantenimiento, lo cual produce pérdidas en la productividad de la empresa.

Además, por un lado, los distribuidores de equipos de automatización normalmente poseen variadores de frecuencia y motores de corriente alterna en modalidad de entrega inmediata. Mientras que, por otro lado, los equipos en corriente continua poseen un tiempo de entrega que puede tardar algunas semanas, por lo que trabajar con estos equipos implicaría también tener un reemplazo en la bodega en caso de una falla de un equipo en operación.

Asimismo, los motores y controles de velocidad en CA han tenido una gran proliferación en los años recientes, debido a que cada vez son más confiables, presentan menos pérdidas y poseen una mayor eficiencia. Al igual que los motores de CC, se requiere de un variador de frecuencia para los motores de CA para el control de velocidad. Además, la electrónica de potencia ha presentado grandes avances, supliendo circuitos de control que permiten manipular altas cantidades de corriente y tensión necesarias para que dichas máquinas puedan funcionar, y también cuentan con módulos de comunicación que permiten realizar configuraciones remotas, medir y monitorear indicadores de las máquinas y realizar diagnósticos.

Actualmente, la mayoría de fabricantes de equipos eléctricos tienen en sus catálogos de productos opciones tanto en corriente continua, como corriente alterna, aunque la gama de productos en corriente continua no es tan extensa comparada con la variedad que se ofrece en corriente alterna. Por lo que, es normal pensar que, los fabricantes se están orientando más a la producción de equipos en corriente alterna y dejan los equipos de corriente continua para aplicaciones sobre todo del tipo torque constante (tales como grúas, bandas transportadoras y elevadores).

Debido a lo anteriormente explicado, es que se propone la idea de estudiar el reemplazo, de manera metódica, de los sistemas que operan en CC, por sistemas CA con variadores de velocidad con el fin de mejorar el desempeño de la producción y de evitar los inconvenientes que se producen por el uso de las máquinas CC. Lo que se busca con este trabajo es generar una metodología a seguir con el fin de reemplazar la máquina CC por una CA equivalente con un variador de velocidad, que se pueda utilizar en un escenario real, especialmente en la industria plástica.

Asimismo, otra de las razones por las cuales se considera que es adecuado desarrollar este proyecto, es porque a nivel nacional, la industria plástica realiza aportes tanto en la parte económica como en la parte ambiental. A nivel económico, la industria plástica es generadora de miles de puestos de empleo directos con los cuales muchas familias obtienen su sustento, por lo cual sería adecuado proveer a los trabajadores con equipos más recientes que permitan realizar sus labores de manera más adecuada y segura.

Por otro lado, a nivel ambiental, la industria plástica ha hecho esfuerzos por mejorar las calidad de sus procesos y las materias primas que utiliza, las cuales son procesadas en distintas máquinas, entre las cuales destacan las extrusoras, así como también la reducción de la contaminación que generan los desechos plásticos y un mejor manejo de la energía eléctrica que consumen, por lo que, cualquier aporte que se pueda realizar a esta industria en aras de mejorar el proceso de producción merece la pena de ser tomado en cuenta.

Por lo anteriormente descrito, es que las empresas de plásticos a nivel nacional buscan realizar este tipo de cambios en los equipos utilizados en las industrias, por lo cual se considera que la contribución de este trabajo vendría siendo en el área técnica con un aporte social, económico y ambiental a nivel nacional.

1.2 Planteamiento del problema

De forma concreta, el problema a estudiar es el comportamiento de las características de par y velocidad de un motor de corriente continua y compararlas con la que se genera en un motor de corriente alterna que funciona con un variador de velocidad cuando ambos se someten a la misma carga, que sería una extrusora de plástico. Para ello, se pretende realizar simulaciones de sistemas en corriente continua y corriente alterna, y realizar las mediciones de las variables más relevantes, tales como corrientes, tensiones, velocidad rotacional, par desarrollado, temperatura de las máquinas, entre otros. Con estos datos se construyen gráficos que permitan comparar el desempeño de cada máquina.

De esta manera, se obtendría una forma de comparar los comportamientos de ambas máquinas y determinar las propiedades que debe cumplir el motor CA para igualar la característica par-velocidad del motor CC cuando se controla una extrusora de plástico con el fin de que la primera pueda servir como reemplazo de la última. Finalmente, a partir de los resultados que se obtengan de las simulaciones realizadas, se procedería a sintetizar una metodología o “buenas prácticas” que permitan realizar un reemplazo de un sistema de CC por uno de CA en extrusoras de plástico.

1.3 Objetivos

Para el desarrollo de este trabajo, se han planteado los siguientes objetivos, general y específicos:

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología para el reemplazo de motores de CC que impulsan sistemas extrusores de plástico, por medio de motores de CA con variador de velocidad electrónico, considerando los requerimientos de par-velocidad de la extrusora de plástico.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Identificar, a partir de la investigación teórica de los motores CC y CA, sus respectivos controles de velocidad y las cargas mecánicas donde se aplican, los requerimientos que debe tener un motor CA que pueda servir como reemplazo de un motor CC en un sistema extrusor de plástico.
2. Establecer los requerimientos de instalación eléctrica y mecánica que deben tomarse en cuenta al instalar un motor de CA con variador de velocidad electrónico, como sustitución de un sistema CC.
3. Establecer una metodología de reemplazo de motores de CC con controlador de velocidad por motores de CA con variador, que considere los requerimientos de par-velocidad de la carga y un equivalente eléctrico y mecánico entre ambos sistemas.
4. Desarrollar simulaciones que permitan hacer el ajuste y comprobación de la metodología propuesta, simulando distintos casos siguiendo el comportamiento de una extrusora de plástico.

1.4 Metodología

El desarrollo del trabajo es basado en simulaciones realizadas en el software *Simulink*® en conjunto con *MATLAB*®. Se aplicarán los conceptos teóricos descritos en el Marco Teórico a la solución del problema, a través de distintas etapas, las cuales se detallan a continuación:

1. **Planteo de la propuesta metodológica:** El primer paso que se realiza es el del planteo de la propuesta metodológica de la cual trata el trabajo. Para esto, se parte de la investigación teórica que se desarrolla en el marco teórico, así como también del análisis del problema a resolver, que, en este caso, es el reemplazo del sistema CC actual por otro sistema CA moderno.
2. **Trabajo con el Motor CC:** Primero se implementa la simulación del motor de corriente continua y se verifica que sea plenamente funcional, tomando en cuenta los

aspectos que se mencionan en el marco teórico y consideraciones de los sistemas reales. Se aplican distintas pruebas que verifiquen el correcto funcionamiento del sistema simulado, a través de la medición de variables eléctricas y mecánicas. Asimismo, también se diseñan pruebas para medir la eficiencia del motor y la temperatura. Durante esta etapa, también se da la determinación de la característica par-velocidad de la extrusora, ya que esta es la carga mecánica que los motores van a manejar. Para esto, se ocupa saber su torque y su velocidad, ya que esto es lo que se marcaría principalmente en las curvas par-velocidad de los motores.

3. **Trabajo con el Motor CA:** De manera análoga como se procedió con el sistema de corriente continua, se procede con el motor de corriente alterna. Se implementa una simulación que sea funcional y permita recopilar los datos más relevantes de la máquina en pruebas de control de velocidad. De igual manera, también se realizan simulaciones que permitan determinar la eficiencia y la temperatura de la máquina. Los resultados obtenidos en la etapa anterior sirven de base de comparación para los resultados obtenidos en este paso y probar la validez de la metodología.

1.5 Alcance

El trabajo abarca el estudio de las características de par y velocidad del motor de corriente continua de excitación independiente y del motor de inducción trifásico de jaula de ardilla, cuando ambos son sometidos a una carga de par constante. Se propone comparar estos resultados con el objetivo de deducir la metodología que se debe de seguir para reemplazar un motor de corriente continua por uno de corriente alterna.

Se sabe que la mayoría de los motores de CA que se utilizan en la industria son motores de inducción trifásicos del tipo jaula de ardilla, por lo que, si se fuera a realizar un reemplazo del motor de CC por uno de CA, se esperaría que fuera un motor de CA de este tipo específico. En cuanto al motor de CC de excitación independiente, se escogió este motor en particular ya que, en la industria plástica, lo más usual es usar motores de CC de este tipo. En la configuración de excitación independiente, el campo se alimenta con una tensión fija y solo se controla la tensión de la armadura.

Se debe destacar también que el trabajo estará limitado a una evaluación técnica, por lo que no se incluyen aspectos económicos que también se toman en cuenta a la hora de realizar estos trabajos en el ámbito profesional. Esto, debido a que considerar aspectos económicos haría más oneroso el proceso de migración, además de que eso dependerá del capital disponible por parte de la industria plástica para llevar a cabo el proceso, y eso alejaría los análisis desarrollados del objetivo general del trabajo. Asimismo, la propuesta puede ser que sea bastante costosa, pero se considera que está bien diseñada, por lo que queda en el personal técnico si la elige o la descarta.

Y además se debe destacar también que el proyecto no incluye la evaluación del sistema de automatización per sé, ya que, si bien es cierto, es necesario realizar una visita a la planta para evaluar el sistema CC actual, el cual es muy probable que esté monitoreado y controlado desde un SCADA o una HMI en la sala de control por los operarios, dado que este es un trabajo de simulación, esto no se puede considerar. Sin embargo, para que el reemplazo pueda llevarse de manera exitosa, especialmente al final del proceso, se debe incluir un estudio de este tipo.

1.6 Procedimiento de evaluación

Dado que se trata de una investigación de tipo simulación, la verificación de los resultados estará de la mano con la realización de las simulaciones. Principalmente, cuando se trabaja con los motores, se realizarán mediciones de indicadores de desempeño; es decir, indicadores que permitan estudiar la robustez de cada motor ante las condiciones de trabajo.

Entre los indicadores que se medirían para cada motor, están:

- Corrientes y tensiones
- Velocidad.
- Torque mecánico.
- Pérdidas y eficiencia
- Temperatura.

Para la parte de determinación de la eficiencia en el motor de corriente continua, se utilizan las normas y procedimientos establecidos en el estándar IEEE-113 “IEEE Guide: Test Procedures for Direct-Current Machines” el cual establece métodos que poseen validez para determinar la eficiencia de una máquina de corriente continua. Según lo que establece dicho estándar, la eficiencia de motor de corriente continua se puede determinar midiendo tanto la potencia de entrada, que es eléctrica, y la potencia de salida, que es mecánica, así como también se puede determinar la eficiencia si se conocen las pérdidas que se dan en la máquina y se le restan a la potencia de entrada (IEEE, 1985).

En el caso del motor de corriente alterna, se utilizaría la normativa CSA-390-10 “Test methods, marking requirements and energy efficiency levels for three-phase induction motors”, la cual es de origen canadiense y es la base sobre la cual se fundamenta la normativa nacional para pruebas en motores de corriente alterna (Canadian Standard Association, 2010). Al igual que el estándar de corriente continua, dicho documento también cuenta con una serie de procedimientos y fórmulas para determinar la eficiencia de un motor de corriente alterna. En el caso del estándar canadiense, la eficiencia se determina como la potencia de entrada menos las pérdidas, y se realiza una corrección de las pérdidas en caso de ser necesario por cambios en la temperatura.

CAPÍTULO 2: Desarrollo teórico

En este capítulo se detallan los principales aspectos teóricos sobre los cuales se basa este proyecto. Principalmente se cubre tópicos de máquinas eléctricas, electrónica de potencia y teoría de control. Además, se abarcan temas adicionales a modo de información adicional como los aspectos eléctricos y mecánicos que se deben considerar a la hora de realizar un reemplazo en un sistema real, los tipos de cargas mecánicas que normalmente son operadas por motores eléctricos y los motores de tipo “para uso con variador electrónico”, los cuales se emplean como alternativa a los motores tradicionales, especialmente debido a algunos efectos adversos que surgen del uso de circuitos de electrónica de potencia.

2.1 Aspectos generales de los motores eléctricos

Los motores eléctricos son el eje central de este proyecto, ya que, como el título se busca reemplazar un motor de CC por uno de CA. En esta sección se abarcan los principales aspectos de los motores de CC y CA, así como también una breve comparación entre ambos tipos de máquinas. Se describen además los métodos de control utilizados para ambos tipos de máquinas. Luego se detallan dos estándares internacionales utilizados para medir la eficiencia de cada uno de los motores y se mencionan también los niveles de eficiencia estándar que cada máquina de cumplir. Finalmente, se describe un modelo térmico que se puede usar para máquinas eléctricas, y que es aplicable tanto a motores de corriente continua como motores de corriente alterna.

2.1.1 Motores de corriente continua

Los motores de corriente continua, funcionan debido a que se coloca el devanado de campo en el estator y el devanado de armadura en el rotor, de tal manera que se hace circular corriente continua por el devanado de campo para producir un flujo electromagnético en la máquina (Fitzgerald et. al., 2003). Entonces, se induce tensión alterna en el devanado de armadura. Para corregir este fenómeno, se utiliza un ensamble mecánico compuesto de un conmutador y escobillas que funciona como rectificador o inversor, de tal forma que la tensión en terminales de la armadura es unidireccional (Sen, 1997).

Desde el punto de vista constructivo, el estator es de polos salientes que son excitados por uno o más devanados que pueden conectarse en distintas configuraciones, tales como serie, derivación, compuesto o excitación independiente, de las cuales, dos se observan en la figura 2.1, que producen una distribución del flujo en el entrehierro. El sistema conmutador y escobillas está colocado de tal manera que, cuando los lados de un devanado de armadura pasan a través del medio de la región de los polos de campo, la corriente a través de él cambia de dirección, tal que todos los conductores de un polo portan corriente en una dirección (Sen, 1997; Leonhard, 1996).

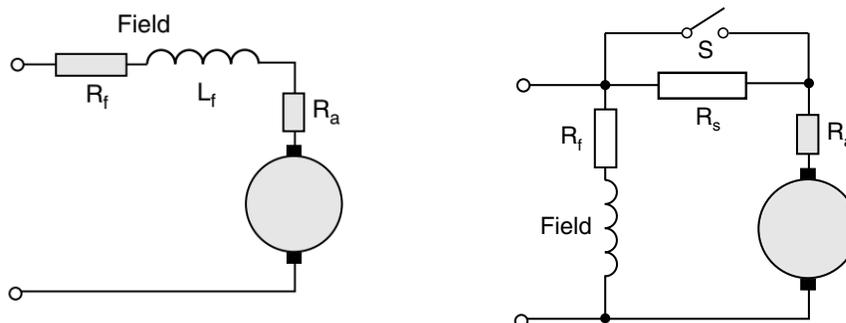


Figura 2.1: Esquemático de motor de CC con excitación en serie (izquierda) y excitación en derivación (derecha) (Hughes, 2006).

La configuración del motor de CC, es un factor importante que se debe considerar en el análisis de los motores de CC, ya que la conexión de los devanados de campo y armadura afecta principalmente la velocidad y el torque que desarrolla la máquina. En el caso de este trabajo, se utilizará para las simulaciones un motor de corriente continua del tipo excitación independiente, y se mencionan solo de manera teórica la configuración serie y derivación.

2.1.1.1 Motor CC de excitación independiente

Los motores de excitación independiente se comportan de manera muy similar a los motores con el devanado de campo en derivación. Estos motores ofrecen características de par de velocidad relativamente planas. Combinado con una velocidad sin carga inherentemente controlada, esto proporciona una buena regulación de la velocidad en amplios rangos de carga. Si bien el par de arranque es comparativamente más bajo que otros tipos de conexiones de los motores CC, los motores de excitación independiente y los que poseen el devanado de campo en derivación ofrecen un control simplificado para inversión de velocidad (Barnes, 2003). Esto se observa en la figura 2.2.

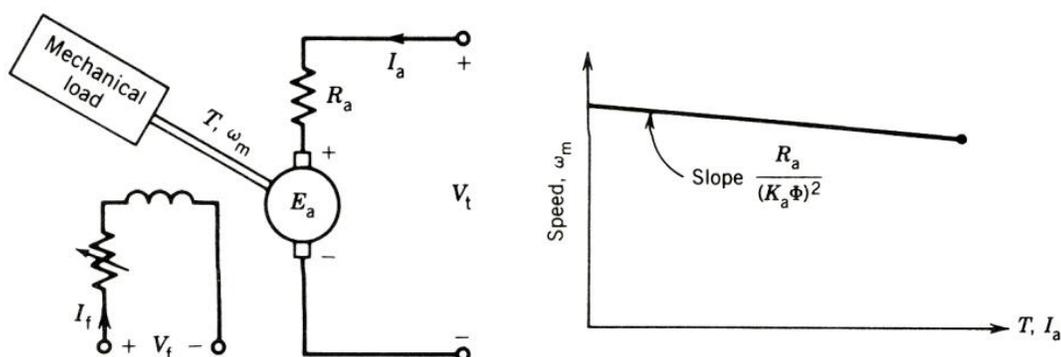


Figura 2.2: Diagrama de conexión del motor CC de excitación independiente y su curva par-velocidad (Sen, 1997).

Para el caso de los motores de excitación independiente, el control de la velocidad se realiza alterando únicamente la amplitud de la tensión aplicada al devanado de armadura, ya que el devanado de campo se alimenta con una fuente independiente. El control se realiza utilizando circuitos de electrónica de potencia, especialmente convertidores CC-CC, que toman una tensión fija de entrada y la convierten en una tensión variable de salida, de acuerdo con la velocidad que se desea.

Normalmente los controles se implementan de manera analítica, por lo que basta conocer los parámetros de la máquina y aplicar la teoría de control clásico para ajustar los controladores. Se debe realizar un análisis de la planta eléctrica primero, es decir el circuito de armadura, y luego se analiza la parte mecánica, es decir los torques que intervienen en la dinámica de la planta.

2.1.1.2 Motor CC con excitación serie

Los motores en serie tienen la armadura conectada en serie con el campo. Si bien ofrece un par de arranque muy alto y un buen par por amperio, el motor en serie tiene una regulación de velocidad deficiente. La velocidad de los motores CC serie generalmente está limitada a 5000 rpm o menos. Los motores serie deben evitarse en aplicaciones donde es probable que pierdan su carga debido a su tendencia a "escapar" en condiciones sin carga (figura 2.3) (Barnes, 2003).

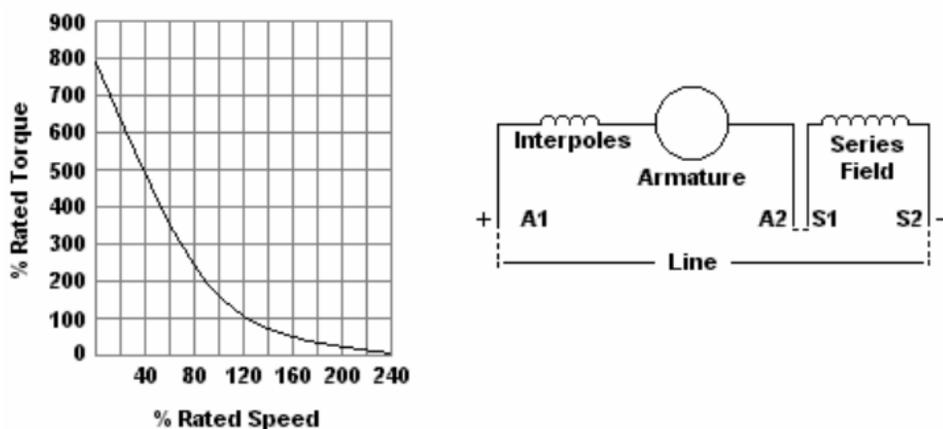


Figura 2.3: Esquema del motor CC en serie y su curva par-velocidad (Barnes, 2003).

2.1.1.3 Motor CC con excitación compuesta

Los motores de bobinado compuesto, cuyo esquemático y curva de par velocidad se muestran en la figura 2.4, utilizan un devanado de campo en serie con la armadura además del campo de derivación para obtener un compromiso en el rendimiento entre un motor de tipo serie y derivación. Este tipo ofrece una combinación de buen par de arranque y estabilidad de velocidad. La composición estándar es de aproximadamente el 12%. Se pueden suministrar

compuestos más pesados de hasta 40 a 50% para aplicaciones especiales de alto par de arranque, como polipastos y grúas (Barnes, 2003).

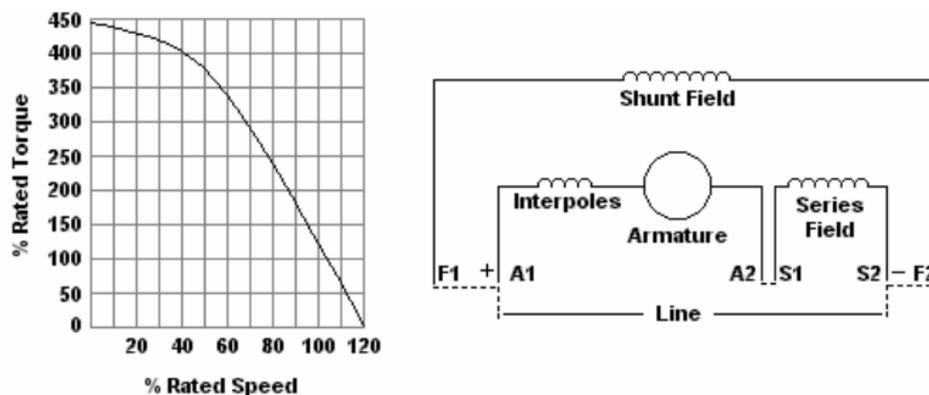


Figura 2.4: Esquemático del motor CC compuesto y su curva par velocidad (Barnes, 2003).

2.1.2 Motores de inducción trifásicos de jaula de ardilla

El otro tipo de motor que se utilizará en este trabajo, es el motor de inducción trifásico de jaula de ardilla. En estos motores el devanado del estator funciona tanto como devanado de campo como devanado de armadura. Al alimentar este devanado con una fuente trifásica alterna, se produce un flujo en el entrehierro de la máquina que gira a una velocidad específica, denominada *velocidad sincrónica* (Chapman, 2012; Sul, 2011). En la figura 2.5, se muestra el circuito equivalente por fase de un motor de inducción.

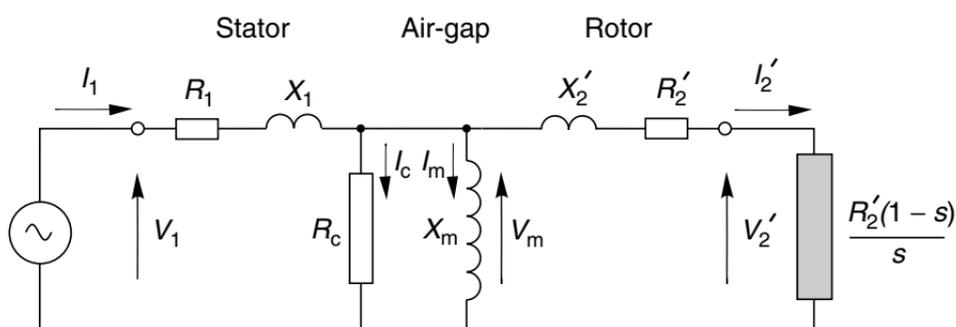


Figura 2.5: Circuito equivalente por fase de un motor de inducción trifásico con el rotor reflejado en el estator (Hughes, 2006).

Estos motores poseen un estator en el cual se colocan los devanados desplazados 120° entre sí. La topología del motor se denomina “jaula de ardilla” dado que el rotor consta de una serie de barras conductoras colocadas entre las ranuras en la cara del rotor y se ponen en cortocircuito en uno de los extremos mediante anillos (Chapman, 2012).

El control de los motores de inducción suele ser más complicado que el control de los motores de corriente continua, puesto que al ser variables en corriente alterna, las tensiones tienden a variar con respecto al tiempo, por lo que, para realizar el control de estos motores, se necesita primero pasar del marco de referencia variante en el tiempo, a un marco invariante en el tiempo, donde las tensiones y las corrientes se comportan como si fueran valores de corriente continua.

La otra opción para controlar la velocidad en estos motores es manteniendo el flujo de campo electromagnético en el entrehierro en un valor constante, por lo que, si se da un cambio en la velocidad, esto se refleja en la frecuencia, de tal manera que se ajusta la tensión suministrada al motor. Estos métodos de control se explican con más detalles en la sección 2.2.

2.1.3 Comparación entre los motores de CC y los motores de CA

Ya se explicó de manera breve, la teoría referente a los motores de CC y CA. Ahora, se realiza una breve comparación entre dichas máquinas. La física de cada máquina es distinta, dado que cada una funciona con un tipo de corriente distinta, por lo que su desempeño será diferente en las mismas tareas (Melfi, 1993).

En la figura 2.6 se muestran las comparaciones de varios indicadores importantes cuando se trabaja con motores. Estas comparaciones se realizaron para motores cuya potencia oscila desde los 100 hp hasta los 500 hp. Se ve que, en muchos casos, los motores de CC poseen aumentos mayores en indicadores como la temperatura y las pérdidas, a medida que se aumenta la potencia y el tamaño de carcasa, mientras que los motores de CA, por otro lado, muestran una mayor eficiencia a medida que se aumenta la potencia (Melfi, 1993).

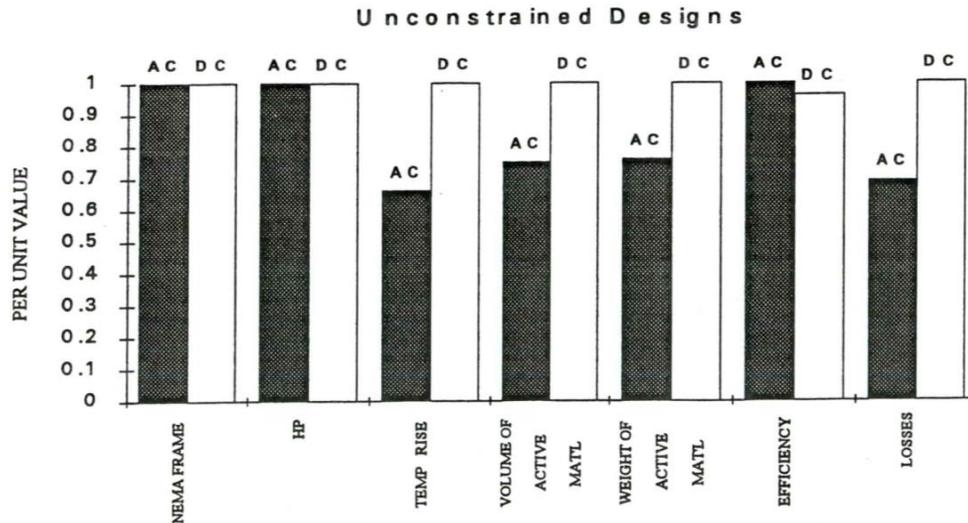


Figura 2.6: Indicadores de desempeño de motores CC y CA (Melfi, 1993).

Asimismo, analizando también el comportamiento de la potencia con respecto a la velocidad del motor, se tiene la curva de la figura 2.7, la cual es típica de los motores CC, y que muestra el comportamiento general del torque con respecto a la velocidad del motor. Para ambos tipos de motores, se observa que, antes de alcanzar la velocidad base, el campo electromagnético en la máquina se centra principalmente en crear torque, mientras que por encima de la velocidad base, se tiene una salida de potencia constante. El comportamiento del campo por debajo de la velocidad base se denomina “campo constante”, mientras que por encima de la velocidad base, se conoce como “debilitamiento del campo” (Melfi, 1993).

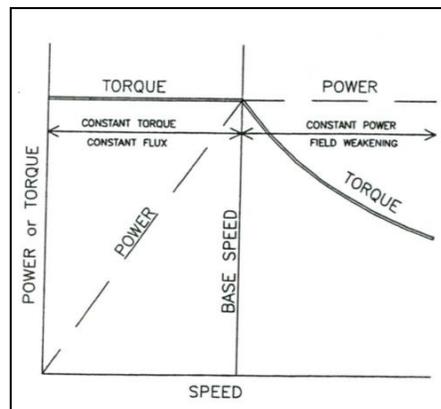


Figura 2.7: Comportamiento del torque y la potencia con respecto a la velocidad para motores de CC (Melfi, 1993).

En el caso de los motores de corriente continua, el debilitamiento de campo se produce por la reacción de armadura, que, si bien este fenómeno es necesario para que el motor funcione, tiene este efecto sobre el flujo del campo electromagnético que fue creado por el devanado de campo.

Otro aspecto que se debe considerar, es la densidad de potencia y torque, en términos de potencia por tamaño de la carcasa o par por tamaño de la carcasa. Las comparaciones de la densidad de potencia en la figura 2.6 se basan en las ofertas típicas del catálogo de motores de CA y CC en tamaños de carcasa NEMA. Los motores de CA tienden a construirse en tamaños de carcasa según NEMA MG13. Estos motores/clasificaciones se basan en el aislamiento de clase B, 1.15 de factor de servicio y la operación en potencia sinusoidal (no en la potencia del inversor). Los motores/clasificaciones de CC tienden a seguir un patrón de aislamiento de clase F, 1.0 de factor de servicio y están clasificados para funcionar con fuentes de alimentación rectificadas (Melfi, 1993).

Para Kulak et. al. (2002), los sistemas de CC son los más adecuados para aplicaciones donde:

- Las condiciones ambientales que rodean el motor de CC son razonablemente limpias y secas (ver sección 2.5.2 para más detalles).
- Donde las velocidades del motor alcanzan hasta 2500 rpm.
- Los pares de arranque son superiores a 150 Nm.
- Los requisitos de potencia son bajos a medios (fracciones de hp a 1000 hp).

Asimismo, según Kulak et. al. (2002), las unidades de CA son las más adecuadas para aplicaciones donde:

- El entorno que rodea el motor de CA está sucio, corrosivo, potencialmente explosivo o mojado (en casos más extremos, se requieren gabinetes especiales).
- Los motores CC están disponibles, pero tienen un mantenimiento limitado.
- Velocidades de hasta 6000 rpm, y se necesita una regulación precisa de la velocidad de lazo cerrado.
- Las aplicaciones requieren un par de carga completa a velocidad cero (los variadores de CA sin control vectorial no tienen esta capacidad).
- Se necesita un control de velocidad coordinado para múltiples unidades.
- Los requisitos de potencia de caballos son de bajo a alto (3 hp a más de 10,000 hp).

2.1.4 Estándares de pruebas para motores eléctricos

Como se mencionó en el capítulo 1, para realizar las pruebas de eficiencia de los motores, se recurren a estándares que tengan reconocimiento internacional con el objetivo de que los resultados que se obtengan sean válidos. En el caso de corriente continua, se recurre al estándar IEEE 113 de 1985, titulado “IEEE Guide: Test Procedures for Direct-Current Machines” (traducido como “Guía IEEE: Procedimientos de Prueba para Máquinas de Corriente Continua”).

Por otro lado, para el caso de CA, se utiliza la norma CSA 390-10, titulada “Test methods, marking requirements and energy efficiency levels for three-phase induction motors” (traducido como “Métodos de prueba, requisitos de marcado y niveles de eficiencia energética para motores de inducción trifásicos”). La elección de este estándar para CA se debe a que éste fue el estándar que se utilizó como base para realizar el estándar de pruebas de eficiencia en máquinas de CA a nivel nacional.

Un aspecto importante que se debe tomar en cuenta para esta parte es que, aunque en la vida real, la resistencia de los devanados de los motores varía la temperatura, de tal forma que, a mayor temperatura, menor resistencia, para efectos del cálculo de la eficiencia que se realiza en este proyecto, se considera el valor de las resistencias como constante. Esto debido a que también el modelo con el que se cuenta en Simulink® es meramente un modelo electromecánico, por lo que se deja por fuera la variación de la resistencia con respecto a la temperatura.

2.1.4.1 Estándar IEEE 113

Este estándar, como se mencionó, es el estándar utilizado para pruebas en corriente continua. El estándar comprende 4 tipos de pruebas: las pruebas preliminares, que se detallan en el capítulo 4 del estándar; las pruebas para determinación de desempeño, que son las pruebas de eficiencia y se muestran en el capítulo 5; las pruebas para temperatura, que se describen en el capítulo 6 y finalmente las pruebas misceláneas, detalladas en el capítulo 7. Para efectos de este trabajo, puesto que se trabaja con simulación y no con una máquina real, solo se utiliza el capítulo 5, referente a las pérdidas y la eficiencia de la máquina.

El capítulo 5 del estándar contiene 8 secciones. Las primeras 3 tratan los temas de saturación magnética, conmutación y regulación de velocidad en los motores de CC. Las siguientes secciones tratan propiamente las pérdidas, como calcularlas, las pruebas y como se determina la eficiencia. La eficiencia, en la sección 5.4, se define matemáticamente como:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P}{P_{in}} \quad (1)$$

Donde P representa las pérdidas que se dan en el motor, ya sea por efectos eléctricos o mecánicos. En teoría, si a la potencia de entrada se le restan las pérdidas, el resultado es la potencia de salida, que es la potencia que desarrolla el motor. Las pérdidas que se consideran para el motor de corriente continua se detallan en la sección 5.5 y son las siguientes (IEEE, 1984):

- Cobre del devanado de armadura
- Devanado serie
- Contacto y fricción con las escobillas
- Devanado de campo en derivación
- Reóstato y excitador
- Núcleo rotacional
- Fricción mecánica y con el aire (pérdidas mecánicas)
- Ventilación forzada.

Para efectos de este trabajo, puesto que es un proyecto de simulación y se trabaja con un motor de CC de excitación independiente, las pérdidas por devanado de campo en derivación, las del reóstato y excitador y la ventilación forzada no se consideran. El resto de las pérdidas se muestran a continuación (IEEE, 1984):

- Pérdidas en el cobre de la armadura: se producen debido a la resistencia que posee el devanado de la armadura. En las pruebas reales, se debe medir la temperatura en el devanado de la máquina, dado que la resistencia varía con la temperatura. Sin embargo, dado que se trata de una simulación, se considera la resistencia como constante en todo el rango de operación y por la duración de la prueba. Las pérdidas en la armadura son directamente proporcionales al cuadrado de la corriente de armadura, tal como se expresa en la ecuación (2).

$$P_a = I_A^2 R_a \quad (2)$$

- Pérdidas en el devanado serie: las pérdidas en este devanado son similares a las pérdidas en el devanado de armadura. Se calculan con la ecuación (2).
- Pérdidas en las escobillas del conmutador: al tratarse de un motor de corriente continua que funciona con un conmutador, se produce una pérdida de potencia por fricción entre las escobillas y el anillo conmutador. Esta pérdida depende de la corriente de armadura, y la caída de tensión que se da en las escobillas, V_{ce} , que para este caso tiene un valor de 2 V (ecuación (3)).

$$P_{CE} = V_{CE} I_A \quad (3)$$

- Pérdidas en el núcleo: se producen por la histéresis del núcleo ferromagnético y corrientes parásitas que se presentan en el material. Normalmente, estas pérdidas se pueden calcular si se conoce la densidad de flujo en el núcleo del motor. Sin embargo, para efectos prácticos, se puede estimar como un 20% de la potencia nominal de salida.
- Pérdidas mecánicas: normalmente se deben a dos hechos mecánicos que suceden en las máquinas rotativas: fricción y rozamiento con el aire. La fricción se da por el contacto entre el rotor y los cojinetes del motor, y el rozamiento con el aire implica el aire dentro de la carcasa del motor. Estas pérdidas varían de manera proporcional al cubo de la velocidad rotacional. También se pueden tomar como un 15% de la potencia nominal de salida.
- Pérdidas misceláneas o dispersas: corresponden a cualesquiera otras pérdidas que no se pueden ubicar en las otras categorías, y se dan sin importar la precisión con la cual se realicen las mediciones. Por convención, se toman como 1% de la potencia nominal de salida.

Gráficamente, el flujo de potencia en la máquina de CC se observa en la figura 2.8. La potencia convertida es la potencia que se transmite del estator al rotor de la máquina.

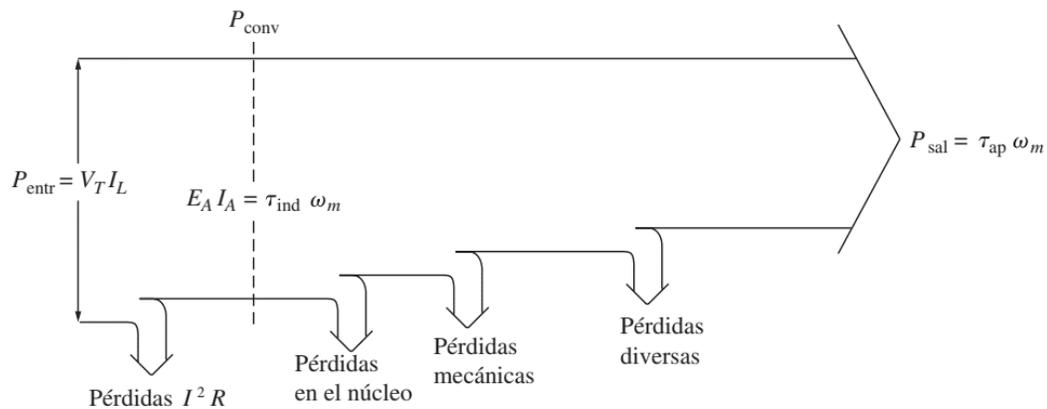


Figura 2.8: Flujo de potencia en el motor de corriente continua (Chapman, 2012)

Más adelante, en la sección 5.8 del estándar, se detalla el procedimiento de prueba para realizar el cálculo de la eficiencia. Según lo que establece el estándar, para el caso de motores CC cuya potencia nominal es un valor entero de hp, el procedimiento consiste en aplicar al motor porcentajes de la carga nominal, empezando desde el valor más alto hasta llegar a la condición de sin carga, con reducciones del 25% entre porcentajes de carga. Es decir, se inicia cargando al motor con el 150% de la carga nominal, y esta carga se va reduciendo en 25% hasta llegar al 0%. Claro está, esto se debe hacer alimentando al motor con la tensión nominal y cuando el motor tenga una temperatura constante (IEEE, 1984).

2.1.4.2 Estándar de medición de eficiencia CSA 390-10

El otro estándar que se utiliza para el motor de CA es el estándar CSA 390-10, de origen canadiense. Este documento cuenta también con ciertas tablas donde se tipifica la eficiencia mínima que debe cumplir un motor de CA de una potencia y una cantidad de polos específicas. El estándar se enfoca principalmente en las pruebas que se utilizan para determinar la eficiencia de un motor de CA. Consta de 9 capítulos, de los cuales, para efectos de este trabajo, el capítulo 7 es el más relevante, ya que detalla los procedimientos de prueba.

El capítulo 7 se divide en dos secciones principales. La primera, sobre las pruebas que se realizan en las máquinas y como ejecutarlas; y la segunda, que detalla los cálculos a realizar con los datos obtenidos para determinar la eficiencia de la máquina en estudio.

En la sección 7.1, se detallan las siguientes pruebas (CSA, 2010):

- Medición de temperatura
- Prueba de “corrida en caliente” (heat-run)
- Prueba de carga
- Prueba de corrección del dinamómetro (solo de ser necesaria)
- Estabilización de potencia de entrada sin carga.
- Prueba sin carga

De las pruebas mencionadas arriba, debido a la naturaleza del proyecto, solo se realizan la prueba de carga y la prueba sin carga.

La prueba de carga, según lo que viene indicado en el documento, establece que el motor debe alimentarse con tensión y frecuencia nominales. El motor se debe cargar con 4 valores de carga nominal, comprendidos entre el 25% y el 100% del par nominal y dos puntos adicionales por encima del 100% pero menores o iguales al 150% del par nominal. Todos los puntos deben estar igualmente espaciados un 25% entre sí, y en cada uno de los puntos de prueba se debe medir (CSA, 2010):

- Torque de salida.
- Potencia de entrada.
- Corriente de línea de cada fase.
- Velocidad rotacional.
- Tensión de línea a línea.
- Frecuencia.

En el caso de la prueba sin carga, el motor se debe alimentar con tres valores de tensión que oscilen entre el 125% y el 60% de la tensión nominal, siendo el punto medio lo más cercano al 100% de la tensión nominal. Luego se deben aplicar otros tres valores de tensión que estén entre el 50% y el 25% de la tensión nominal, siempre suministrando la frecuencia

nominal. El motor en este caso se opera en vacío, es decir, sin ninguna carga en el eje, y para cada valor de tensión, se miden (CSA, 2010):

- Tensión de línea a línea.
- Corriente de línea en cada fase.
- Frecuencia.
- Potencia de entrada.

Una vez realizadas estas dos pruebas, se pasa ahora a la parte de cálculos. Lo primero que se calcula es las pérdidas en el cobre del estator en la prueba sin carga (CSA, 2010):

$$P_{sta,nl}(i) = \frac{1.5 \times I_{avg,nl}^2(i) \times R_s}{1000} \quad (4)$$

Donde

$$I_{avg,nl}(i) = \frac{I_{a,nl}(i) + I_{b,nl}(i) + I_{c,nl}(i)}{3} \quad (5)$$

El índice i representa el valor de corriente de línea obtenido para el valor de tensión i utilizado. Luego se calcula las pérdidas en el núcleo y las pérdidas por fricción mecánica y el aire al sustraer de la potencia de entrada medida en la prueba sin carga, las pérdidas calculadas anteriormente (CSA, 2010):

$$P_{core+wind-fric}(i) = P_{in,nl}(i) - P_{sta,nl}(i) \quad (6)$$

Luego, las pérdidas que se dan únicamente por fricción mecánica y por el aire se calculan tomando los valores de tensión entre el 50% y el 20% de la tensión nominal y se realiza un ajuste de regresión lineal, graficando las pérdidas en el núcleo y la fricción (eje vertical) con respecto a la tensión al cuadrado (eje horizontal). Las pérdidas por fricción mecánica y con el viento se obtienen al extrapolar el ajuste al valor de 0 tensión, es decir el cruce con el eje vertical (CSA, 2010).

Después de esto, se calcula la tensión corregida, siguiendo la ecuación (7):

$$V_{corr,lt} = \sqrt{\left[V_{avg,lt} - \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{avg,lt}(i) \times R_s \times \cos(\phi) \right]^2 + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{avg,lt}(i) \times R_s \times \sin(\phi) \right]^2} \quad (7)$$

Donde

$$V_{avg,lt}(i) = \frac{V_{ab,lt}(i) + V_{bc,lt}(i) + V_{ca,lt}(i)}{3} \quad (8)$$

$$I_{avg,lt}(i) = \frac{I_{a,lt}(i) + I_{b,lt}(i) + I_{c,lt}(i)}{3} \quad (9)$$

$$\cos(\phi) = f.p. = \frac{P_{in,lt}(i)}{\sqrt{3} \times V_{avg,lt}(i) \times I_{avg,lt}(i)} \quad (10)$$

$$\sin(\phi) = \sqrt{1 - \cos^2(\phi)} \quad (11)$$

Estos cálculos se realizan utilizando las mediciones que se obtuvieron en las pruebas de carga del motor, de ahí el subíndice lt , para cada valor i -ésimo de la carga nominal aplicada al motor. Esta tensión corregida se utiliza para calcular las pérdidas por fricción mecánica y el viento para las tensiones entre el 125% y el 60% de la tensión nominal, utilizando la misma metodología (CSA, 2010). Posterior a esto se calcula ahora las pérdidas por cobre en el estator en las pruebas con carga, usando la ecuación (12):

$$P_{sta,lt}(i) = \frac{1.5 \times I_{avg,lt}^2(i) \times R_s}{1000} \quad (12)$$

Después, se calculan las pérdidas en el rotor. Para esto, primero se debe calcular la velocidad sincrónica, según sea la frecuencia obtenida en cada una de las pruebas de carga, utilizando la ecuación (13):

$$n_{s,lt}(i) = \frac{120 \times f_{lt}(i)}{p} \quad (13)$$

Luego se calcula el deslizamiento obtenido para cada caso:

$$s_{lt}(i) = \frac{n_{s,lt}(i) - n_{r,lt}(i)}{n_{s,lt}(i)} \quad (14)$$

Por lo que, las pérdidas en el rotor se pueden calcular como:

$$P_{rot,lt}(i) = s_{lt}(i) \times (P_{in,lt}(i) - P_{sta,lt}(i) - P_{core}(i)) \quad (15)$$

Finalmente, se calculan las pérdidas misceláneas. Para ello primero se calcula la potencia de salida que tiene el motor:

$$P_{out,lt}(i) = \frac{\tau_{lt}(i) \times n_{lt}(i)}{9549} \quad (16)$$

Y las pérdidas misceláneas se calculan como:

$$P_{res,lt}(i) = P_{in,lt}(i) - P_{sta,lt}(i) - P_{core}(i) - P_{rot,lt}(i) - P_{frict-wind}(i) - P_{out,lt}(i) \quad (17)$$

Finalmente, se obtiene la potencia de salida como:

$$P_{corr-out,lt}(i) = P_{in,lt}(i) - P_{sta,lt}(i) - P_{core}(i) - P_{rot,lt}(i) - P_{frict-wind}(i) - P_{res,lt}(i) \quad (18)$$

Y la eficiencia se obtendría como:

$$\eta(i) = \frac{P_{corr-out,lt}(i)}{P_{in,lt}(i)} \quad (19)$$

Se debe destacar que el estándar pide que se realicen mediciones de temperatura y algunos parámetros se deben corregir debido a estas mediciones, puesto que la temperatura afecta los parámetros del motor. Esto, sin embargo, se omitió también para este caso, puesto que el modelo electromecánico no involucra la variación de la temperatura.

2.1.5 Eficiencias de los motores eléctricos

Ahora que se han explicado los métodos empleados para medir la eficiencia de los equipos, tanto en CC como en CA, se analizan ahora los estándares de eficiencia establecidos para estos equipos. Hoy en día, el consumo de energía por parte de los motores eléctricos representa alrededor del 40% de la energía consumida a nivel mundial. Es por eso que se busca que estos equipos sean lo más eficientes posibles, con el fin de minimizar las pérdidas energéticas y evitar el desperdicio (EnergyPurse, s.f.).

Actualmente, para los motores de CA, la IEC ha establecido 4 categorías de eficiencia. Esto se explica más detalladamente en el estándar 60034-30. Los motores que se cubren en documento cumplen las siguientes características (EnergyPurse, s.f.):

- Motores eléctricos de una sola velocidad sincrónica, 50 Hz o 60 Hz, ya sean monofásicos o trifásicos.
- Motores de 2, 4, 6 u 8 polos.
- Potencia nominal de salida desde 0.12 kW hasta 1 MW.
- Tensión nominal de alimentación desde 50 V hasta 1 kV.
- Motores capaces de operación continua con elevación de la temperatura dentro de la clase de aislamiento térmico especificado.
- Motores con temperatura ambiente de operación entre los -20 °C y 60 °C.
- Motores con altura máxima de operación de 4000 m.s.n.m.

El estándar define las siguientes 4 categorías de eficiencias (EnergyPurse, s.f.):

- Eficiencia estándar IE1
- Alta eficiencia IE2
- Eficiencia premium IE3
- Eficiencia súper premium IE4

Los niveles de eficiencia definidos en IEC / EN 60034-30-1 se basan en los métodos de prueba de baja incertidumbre especificados en IEC 60034-2-1, que se ha actualizado a la edición 2.0, 2014-06. La documentación del fabricante debe mostrar cómo se determinan los valores de eficiencia. Los valores de eficiencia solo se pueden comparar si se basan en el mismo método de prueba (EnergyPurse, s.f.).

Aunque la IEC ha realizado mucho trabajo para crear un estándar único y armonizado, algunos países y regiones aún utilizan estándares de eficiencia locales. Pero en muchos casos, los niveles de eficiencia IEC se superponen con los estándares locales. Un ejemplo típico de esto sería EUA, donde los estándares de eficiencia NEMA para motores eléctricos todavía se utilizan ampliamente, pero para más del 95 por ciento de las clasificaciones, la clasificación premium NEMA es idéntica a la clasificación IEC de IE3 (U.S. Department of Energy, 2014). Esto se muestra en la figura 2.9.

En la figura 2.10, se muestran los umbrales mínimos de eficiencia premium que debe cumplir un motor con frecuencia nominal de 60 Hz, para potencias desde 1 hp hasta 500 hp, según la cantidad de polos que tenga el motor y el tipo de encerramiento (EnergyPurse, s.f.).

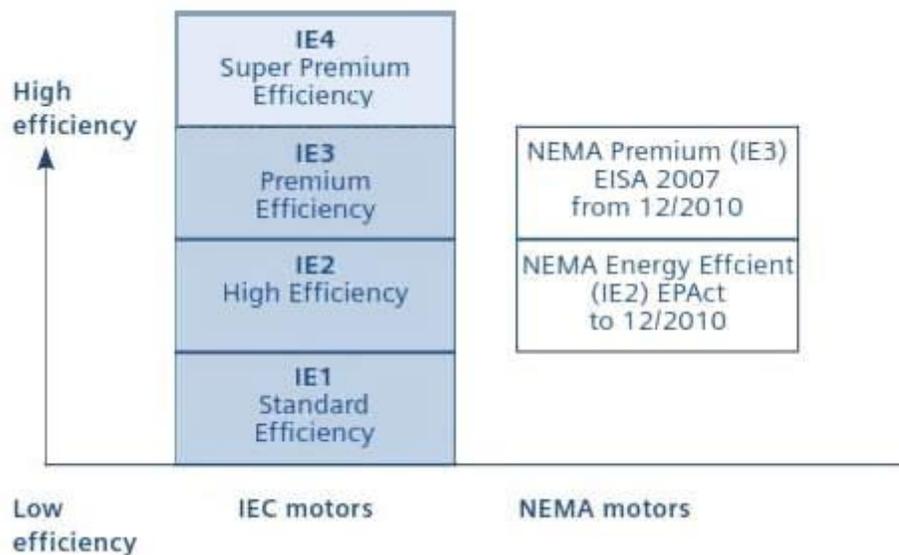


Figura 2.9: Comparación entre los estándares de eficiencia IEC y el estándar NEMA (Collins, 2020).

| HP | OPEN MOTORS | | | | | | ENCLOSED MOTORS | | | | | |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 2 POLE | | 4 POLE | | 6 POLE | | 2 POLE | | 4 POLE | | 6 POLE | |
| | Nominal Efficiency | Minimum Efficiency |
| 1 | 77.0 | 74.0 | 85.5 | 82.5 | 82.5 | 80.0 | 77.0 | 74.0 | 85.5 | 82.5 | 82.5 | 80.0 |
| 1.5 | 84.0 | 81.5 | 86.5 | 84.0 | 86.5 | 84.0 | 84.0 | 81.5 | 86.5 | 84.0 | 87.5 | 85.5 |
| 2 | 85.5 | 82.5 | 86.5 | 84.0 | 87.5 | 85.5 | 85.5 | 82.5 | 86.5 | 84.0 | 88.5 | 86.5 |
| 3 | 85.5 | 82.5 | 89.5 | 87.5 | 88.5 | 86.5 | 86.5 | 84.0 | 89.5 | 87.5 | 89.5 | 87.5 |
| 5 | 86.5 | 84.0 | 89.5 | 87.5 | 89.5 | 87.5 | 88.5 | 86.5 | 89.5 | 87.5 | 89.5 | 87.5 |
| 7.5 | 88.5 | 86.5 | 91.0 | 89.5 | 90.2 | 88.5 | 89.5 | 87.5 | 91.7 | 90.2 | 91.0 | 89.5 |
| 10 | 89.5 | 87.5 | 91.7 | 90.2 | 91.7 | 90.2 | 90.2 | 88.5 | 91.7 | 90.2 | 91.0 | 89.5 |
| 15 | 90.2 | 88.5 | 93.0 | 91.7 | 91.7 | 90.2 | 91.0 | 89.5 | 92.4 | 91.0 | 91.7 | 90.2 |
| 20 | 91.0 | 89.5 | 93.0 | 91.7 | 92.4 | 91.0 | 91.0 | 89.5 | 93.0 | 91.7 | 91.7 | 90.2 |
| 25 | 91.7 | 90.2 | 93.6 | 92.4 | 93.0 | 91.7 | 91.7 | 90.2 | 93.6 | 92.4 | 93.0 | 91.7 |
| 30 | 91.7 | 90.2 | 94.1 | 93.0 | 93.6 | 92.4 | 91.7 | 90.2 | 93.6 | 92.4 | 93.0 | 91.7 |
| 40 | 92.4 | 91.0 | 94.1 | 93.0 | 94.1 | 93.0 | 92.4 | 91.0 | 94.1 | 93.0 | 94.1 | 93.0 |
| 50 | 93.0 | 91.7 | 94.5 | 93.6 | 94.1 | 93.0 | 93.0 | 91.7 | 94.5 | 93.6 | 94.1 | 93.0 |
| 60 | 93.6 | 92.4 | 95.0 | 94.1 | 94.5 | 93.6 | 93.6 | 92.4 | 95.0 | 94.1 | 94.5 | 93.6 |
| 75 | 93.6 | 92.4 | 95.0 | 94.1 | 94.5 | 93.6 | 93.6 | 92.4 | 95.4 | 94.5 | 94.5 | 93.6 |
| 100 | 93.6 | 92.4 | 95.4 | 94.5 | 95.0 | 94.1 | 94.1 | 93.0 | 95.4 | 94.5 | 95.0 | 94.1 |
| 125 | 94.1 | 93.0 | 95.4 | 94.5 | 95.0 | 94.1 | 95.0 | 94.1 | 95.4 | 94.5 | 95.0 | 94.1 |
| 150 | 94.1 | 93.0 | 95.8 | 95.0 | 95.4 | 94.5 | 95.0 | 94.1 | 95.8 | 95.0 | 95.8 | 95.0 |
| 200 | 95.0 | 94.1 | 95.8 | 95.0 | 95.4 | 94.5 | 95.4 | 94.5 | 96.2 | 95.4 | 95.8 | 95.0 |
| 250 | 95.0 | 94.1 | 95.8 | 95.0 | 95.4 | 94.5 | 95.8 | 95.0 | 96.2 | 95.4 | 95.8 | 95.0 |
| 300 | 95.4 | 94.5 | 95.8 | 95.0 | 95.4 | 94.5 | 95.8 | 95.0 | 96.2 | 95.4 | 95.8 | 95.0 |
| 350 | 95.4 | 94.5 | 95.8 | 95.0 | 95.4 | 94.5 | 95.8 | 95.0 | 96.2 | 95.4 | 95.8 | 95.0 |
| 400 | 95.8 | 95.0 | 95.8 | 95.0 | 95.8* | 95.0* | 95.8 | 95.0 | 96.2 | 95.4 | 95.8* | 95.0* |
| 450 | 95.8 | 95.0 | 96.2 | 95.4 | 96.2* | 95.4* | 95.8 | 95.0 | 96.2 | 95.4 | 95.8* | 95.0* |
| 500 | 95.8 | 95.0 | 96.2 | 95.4 | 96.2* | 95.4* | 95.8 | 95.0 | 96.2 | 95.4 | 95.8* | 95.0* |

* NEMA design A and B characteristics do not apply

Figura 2.10: Umbrales de eficiencia mínimos para motores de 60 Hz, para un rango de potencias entre 1 hp hasta 500 hp, según la cantidad de polos y el encerramiento (Boteler, 2013).

Para el caso de los motores CC, dado que es una tecnología que hoy en día no se utiliza tan extensivamente, no se ha hecho un estándar que regule la eficiencia mínima que deba cumplir un motor de este tipo. Los estándares IEC y NEMA aplican para motores de CA. Para el caso de CC, se tiene la tabla 2.1, que enlista eficiencias típicas para algunos motores de CC (Electrical Academia, s.f.).

Tabla 2.1: Eficiencias típicas para motores CC de distintas capacidades nominales (Electrical Academia, s.f.).

| Capacidad nominal (hp) | Eficiencia típica (%) | Pérdidas típicas (hp) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 5 | 74 | 1.76 |
| 50 | 89 | 6.18 |
| 500 | 93 | 37.6 |
| 5000 | 97 | 155 |

2.1.6 Modelado térmico de los motores eléctricos

Finalmente, se evalúa el comportamiento de la temperatura en el motor. Para este fin, se parte de un modelo matemático, puesto que, al tratarse de un proyecto de simulación, el modelo del motor que hay en el software *Simulink*® no incluye un incremento de temperatura, como sucede en los motores reales. El modelo térmico que se utiliza es un modelo apropiado, puesto que muestra primero el ascenso de temperatura como resultado de la operación del motor, hasta que se alcanza el equilibrio térmico.

Para obtener un modelo térmico del motor eléctrico, se parte de la ecuación (20) (Corrales, 1969):

$$Pdt = cGdT + K_d S_d Tdt \quad (20)$$

En esta ecuación, P representa la potencia constante que se transforma en calor en la máquina, que se obtiene como I^2R , donde I es la intensidad de corriente que circula ya sea por la armadura, en el caso del motor CC, o por estator en el caso del motor de CA, y R es la resistencia, ya sea de armadura o de estator, c es el calor específico del material, que, para este caso, se toma como cobre, y tiene un valor de $389 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$, G es el peso activo del material, que varía según sea el tipo de motor, K_d es el coeficiente de ventilación, que para este caso se toma como $13 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ y S_d es el área de refrigeración, en m^2 . En este caso, T representa la temperatura, y la ecuación anterior modela el cambio de temperatura con respecto al tiempo.

Esta es una ecuación diferencial de primer orden, cuya solución se obtiene a través de una función exponencial. La solución de esta ecuación se muestra en la ecuación, donde se ha añadido T_{amb} para denotar la temperatura ambiente, puesto que la temperatura inicial del motor y de los devanados es la temperatura ambiente.

$$T(t) = T_{amb} + \frac{P}{K_d S_d} \left(1 - e^{-t/cG/K_d S_d} \right) \quad (21)$$

Como se puede observar, esta es una función exponencial creciente que llega hasta un valor constante en el estacionario, tal como se espera de un sistema térmico, ya que al final, por más potencia que disipe el motor en sus devanados, el cuerpo ya no puede aumentar de temperatura y se dice que está en equilibrio térmico. La temperatura del ambiente T_{amb} se toma en un valor estándar de 25 °C.

Los parámetros físicos G y S_d , para los motores se obtuvieron a partir de la información de un motor CC de ABB. En el caso de G , dado que se trata del material activo, que en este caso corresponde a cobre, se parte de que del peso total de un motor CC, entre el 15% y el 18% del peso total corresponden al cobre, mientras que, en los motores de CA, es entre un 7% y un 9% (Allance, s.f.), por lo que el peso total de los motores se multiplica por un promedio de estos porcentajes para obtener un valor activo de material. S_d se toma como la sección transversal del motor que aparecen en los esquemáticos de la página de ABB.

2.2 Circuitos de control de motores de CC y CA

El control de los motores se implementa a través de circuitos que involucran electrónica de potencia. Estos circuitos son topologías que involucran componentes capaces de manejar altos niveles de corrientes y tensiones, las cuales están presentes en los motores. En este caso, se aplican dos tipos de circuitos de control:

- Circuitos de control para CC: trata principalmente de convertidores CC-CC, los cuales tienen la función de pasar de un nivel de tensión CC a otro nivel de tensión CC. Esto se realiza con el fin de ajustar la alimentación que recibe el motor en su armadura y, por ende, controlar la velocidad rotacional
- Variador de velocidad o variador de frecuencia: es un equipo que consiste de una etapa de rectificación, seguida de una etapa de inversión. Se utiliza principalmente para controlar la velocidad en los motores de CA, ya que genera una señal alterna PWM con una frecuencia equivalente a la velocidad deseada. La etapa rectificadora es un circuito que convierte una señal CA de entrada a una señal CC de salida. La rectificación es controlada o no controlada, según sea la especificación de diseño. La etapa inversora corresponde a otro circuito usado para pasar una señal CC de entrada a una señal CA de salida en formato PWM, a través del encendido y apagado de transistores.

2.2.1 Circuitos para el control de motores CC

Como se indicó anteriormente, para controlar un motor de CC, normalmente circuitos convertidores CC-CC. Una topología de este tipo de circuito se muestra en la figura 2.11. La mayoría de estas topologías están compuestas por capacitores e inductores, así como diodos de potencia, IGBT o MOSFET de potencia (Rashid, 2011). Normalmente estos equipos constan también de una etapa rectificación previa, dado que las industrias normalmente reciben su alimentación en CA, por lo que se debe hacer una rectificación de dicha señal para luego pasarla al convertidor CC-CC.

Estos circuitos son utilizados en sistemas de control CC, como elementos de tracción eléctrica, vehículos eléctricos y herramientas. Los motores de corriente continua con sus inductancias de bobinado y su inercia mecánica actúan como filtros, lo que da como resultado, corrientes de inducido de alta calidad (Sul, 2011).

La tensión eléctrica de salida promedio de los convertidores es una función lineal de la relación de trabajo del interruptor. La selección de una topología de convertidores CC-CC se determina no solo por las tensiones eléctricas de entrada/salida, que se ajustan adicionalmente con la relación de giros en convertidores aislados, sino también por los niveles de potencia, tensión y corriente de esfuerzo de los interruptores semiconductores, y la utilización de componentes magnéticos (Rashid, 2011).

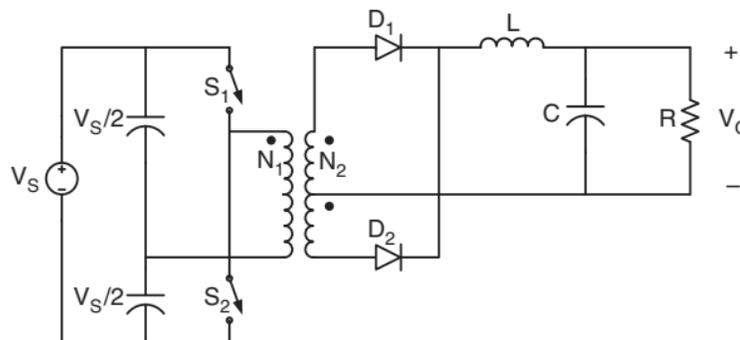


Figura 2.11: Topología de convertidor CC-CC tipo “puente H” (Rashid, 2011).

En la materia de los convertidores CC de la electrónica, debido al énfasis que tiene este proyecto, se da especial atención a los controladores CC, que son los que se utilizan para trabajar con motores CC. En la figura 2.12, se muestra un lazo de control que incluye un rectificador, en el cual se controla tanto la velocidad del motor, como la corriente, que indirectamente se utiliza también para controlar el par del motor (Hughes, 2006).

La transición de la operación hacia adelante y atrás en el motor y los cambios correspondientes en los convertidores requieren circuitos de control lógicos especiales para evitar cortocircuitos en el suministro de CA y para una operación segura. Eso permitirá que tanto

el motor como la generación/producción de par de frenado contribuyan a una aceleración y desaceleración más rápidas en un sentido de rotación (Krishnan, 2001).

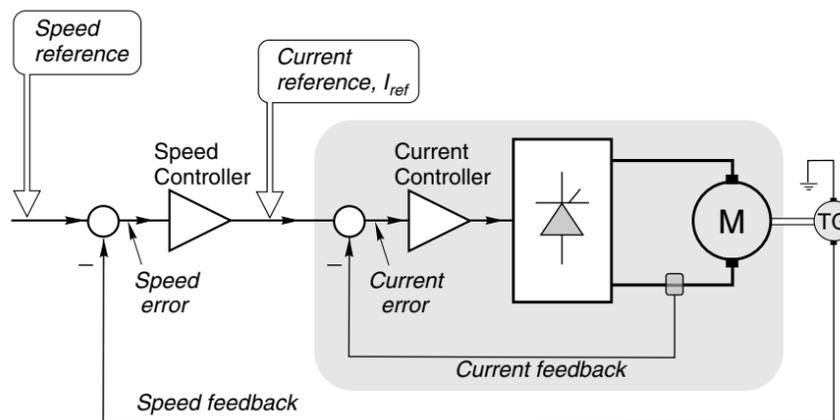


Figura 2.12: Diagrama esquemático para un controlador de velocidad con retroalimentación de corriente y velocidad (Hughes, 2006).

2.2.2 Circuitos para el control de motores de CA: Variadores de velocidad

Es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (CA) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Un variador de frecuencia es un caso especial de un variador de velocidad (Anónimo, 2019).

Los dispositivos variadores de velocidad operan bajo el principio de que la velocidad síncrona de un motor de corriente alterna (CA) está determinada por la frecuencia de CA suministrada y el número de polos en el estator. En los motores asíncronos las revoluciones por minuto son ligeramente menores por el propio asincronismo. En éstos se produce un desfase mínimo entre la velocidad de rotación (rpm) del rotor (velocidad "real" o "de salida") comparativamente con la cantidad de rpm del campo magnético debido a que sólo es atraído por el campo magnético exterior que lo aventaja siempre en velocidad (de lo contrario el motor dejaría de tener par en los momentos en los que alcanzase al campo magnético) (Allen-Bradley, 2013; Anónimo, 2019).

La forma de variar la frecuencia básicamente consta de cambiar el ciclo de trabajo (tiempo ON y tiempo OFF en un período) de una onda cuadrada periódica, de tal forma que el valor medio de la tensión (el promedio) a lo largo del tiempo varíe entre un máximo y un mínimo. La velocidad con que variamos el ciclo de trabajo, o sea su valor medio, será la frecuencia de variación del valor medio. Esto físicamente se logra a través de interruptores electrónicos de conmutación que son los IGBT (transistores bipolares de compuerta aislada) que actúan como interruptores que al cerrarse y abrirse por medio de un software específico conforman la onda cuadrada, que permite obtener la señal sinusoidal (Allen-Bradley, 2013; Anónimo, 2019). La topología básica del variador de velocidad se muestra en la figura 2.13.

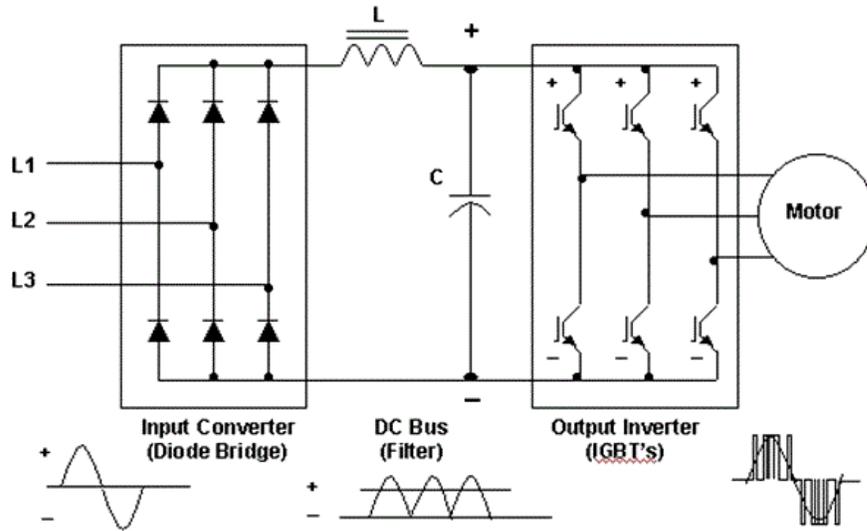


Figura 2.13: Topología de un variador de frecuencias (Anónimo, 2019).

Los rectificadores son circuitos que convierten señales de corriente alterna a corriente continua, como se observa en las figuras 2.14 y 2.15. Estos circuitos son controlados, si se utilizan rectificadores controlados de silicio (SCR por sus siglas en inglés), o no controlados, si solo se utilizan diodos de potencia. Normalmente, estos circuitos dependen de la cantidad de fases que se tienen, de tal forma que se clasifican como monofásicos o trifásicos (Rashid, 2011).

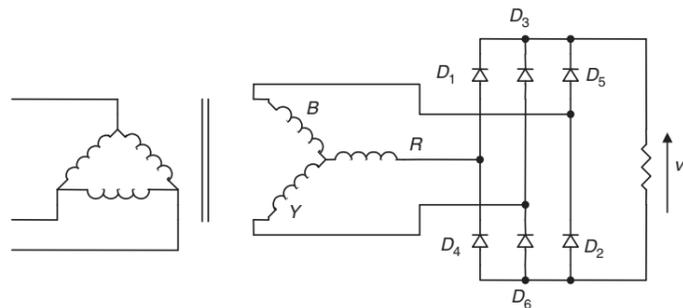


Figura 2.14: Rectificador trifásico no controlado (Rashid, 2011).

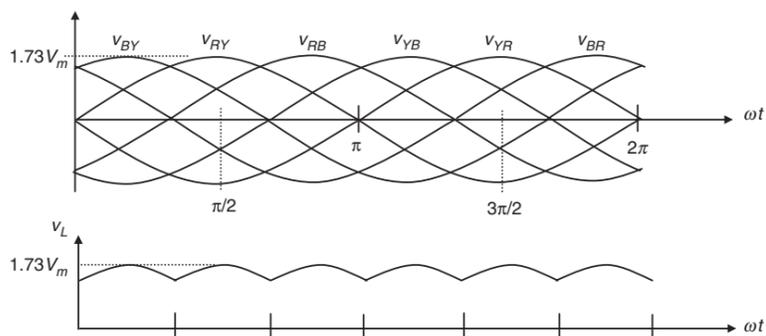


Figura 2.15: Formas de onda de entrada (arriba) y salida (abajo) del rectificador trifásico (Rashid, 2011).

Los rectificadores se utilizan en gran cantidad de equipos que requieran corriente continua, especialmente en los equipos electrónicos, como computadoras y dispositivos inteligentes. Otras aplicaciones que tienen los rectificadores, especialmente los trifásicos, son el control de motores de corriente continua, la alimentación de inversores de potencia para el control de máquinas de inducción, el control de hornos de corriente continua, y la alimentación y control de otras cargas en corriente continua (cargadores de baterías, iluminación, etc.) (Rashid, 2011).

Por otro lado, los inversores, convierten una señal de entrada CC a una señal de salida CA. Estos circuitos también se clasifican como monofásicos o trifásicos, y a diferencia de los rectificadores, estos siempre son controlados, ya que lo que se busca es que la salida CA tenga valores de amplitud y frecuencia específicas, por lo que los elementos de electrónica de potencia que se utilizan siempre deben tener una señal de control (Allen-Bradley, 1992; Rashid, 2011). Una topología inversora se muestra en la figura 2.16.

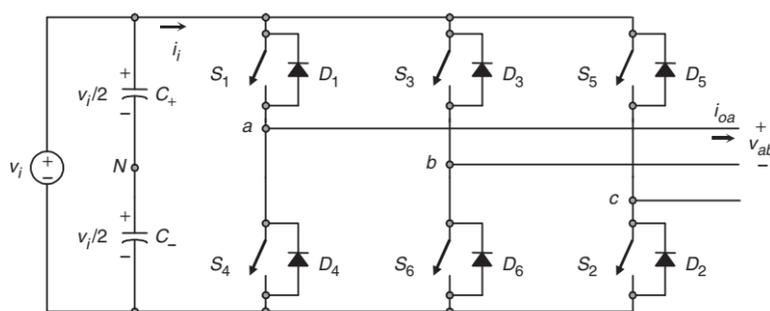


Figura 2.16: Topología de un inversor trifásico de fuente de tensión (Rashid, 2011).

Los inversores encuentran usos en aplicaciones como el control de velocidad, las fuentes de alimentación ininterrumpidas (UPS), los compensadores VAR estáticos, los filtros activos, los sistemas de transmisión CA flexibles, y los compensadores de tensión (Rashid, 2011).

2.2.2.1 Variación de la curva par-velocidad de un motor

Un aspecto importante sobre el uso de motores de CA y variadores, es que las curvas de par y velocidad varían de acuerdo con la frecuencia del sistema, según se muestra en la figura 2.17. La tensión eléctrica de salida se controla de modo que la relación entre tensión eléctrica y frecuencia permanezca constante para evitar el flujo excesivo del motor. El motor de CA proporciona su par nominal en el rango de velocidad de hasta la frecuencia nominal del sistema (50 o 60 Hz) sin un aumento significativo en las pérdidas. El motor puede funcionar a velocidades superiores a la frecuencia nominal, pero con un par de salida reducido. El par se reduce como resultado de la reducción en el flujo de espacio de aire, que depende de la relación V/f . A frecuencias inferiores a la nominal, es posible una salida de par constante desde el motor. A frecuencias superiores a la frecuencia base, el par se reduce en proporción a la reducción de velocidad (Rockwell Automation, 2011).

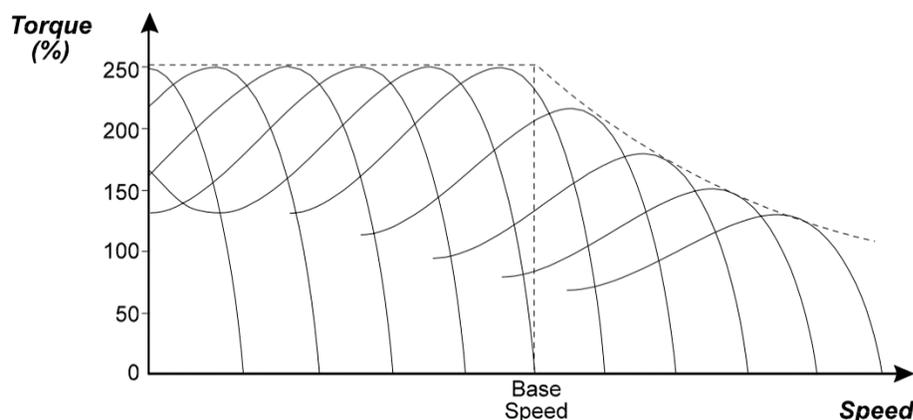


Figura 2.17: Variación de la curva par-velocidad de un motor de corriente alterna por efecto del variador de velocidad (Rockwell Automation, 2011).

2.2.2.2 “Autotuning” o Ajuste automático

El “auto tuning” o autoajuste es una función que traen incluidos los variadores de velocidad que permite al dispositivo hacer los ajustes necesarios al lazo de control, estudiando los parámetros del motor que controla. Una observación muy importante sobre este proceso, es que debe realizarse cuando el motor está frío, ya que el autoajuste con un motor caliente da como resultado una variación en la impedancia que posteriormente provocará la ejecución de un algoritmo de control del motor que no coincide con precisión con la impedancia real del motor (Anónimo, 2015).

Otra observación importante acerca de este proceso, es que cuando se conectan múltiples motores, un autoajuste dará como resultado la lectura de múltiples impedancias de motor conectadas en paralelo (esto no se da en la industria plástica, en la cual, cada motor tiene asignado su propio controlador). Algunas funciones de autoajuste hacen coincidir las lecturas de impedancia con los valores de impedancia de motor típicos conocidos (por ejemplo, un motor NEMA B típico). Como tal, la lectura de múltiples impedancias de motor en paralelo

puede no coincidir con un valor de impedancia de motor conocido o coincidir con un tipo diferente de motor. Esto da como resultado un autoajuste fallido que signifique un nivel de ruido superior al habitual.

El autoajuste es un proceso mediante el cual un variador mide la impedancia de un motor para ajustar el algoritmo de control del motor. El valor medido puede coincidir con la impedancia conocida para un tamaño de motor dado y usarse para determinar las relaciones de tensión eléctrica y corriente a diferentes velocidades. En última instancia, esto permite una conducción más efectiva de una carga del motor, así como una mejor regulación de la velocidad específicamente cuando se ejecuta sin retroalimentación (lazo abierto) (Jones, 2016).

2.3 Control de velocidad de los motores eléctricos

Existen distintos métodos que se utilizan para controlar motores eléctricos, dependiendo de si son motores de corriente alterna o motores de corriente directa. Los motores de corriente continua se pueden controlar los métodos de control clásicos, como el control PID, a partir de una función de transferencia. Los métodos de control de motores de inducción se clasifican en dos categorías, escalares y vectoriales. En este trabajo se abarca el control vectorial orientado a campo indirecto y el control escalar V/Hz.

2.3.1 Control de la máquina de corriente continua

Para el caso de la máquina de corriente continua, el control se puede realizar siguiendo la técnica de control clásico, en la cual se plantea primero la ecuación diferencial, esta se traslada a función de transferencia a través de la transformada de Laplace y luego se ajusta un controlador PI para colocar los polos de lazo cerrado en la posición deseada. Se aplica un modelo de control en cascada, en el cuál primero se sintoniza un controlador esclavo PI para controlar la corriente de armadura. Luego de esto se sintoniza un controlador maestro para la velocidad, y es el que recibe la entrada de velocidad deseada. Esto se muestra en la figura 2.18.

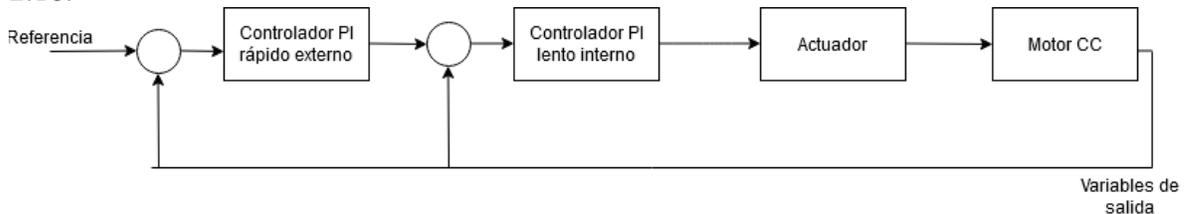


Figura 2.18: Esquema de control en cascada utilizado para controlar al motor CC.

Para diseñar el controlador de corriente de armadura, se parte de la ecuación de la dinámica eléctrica que rige al sistema, que, en este caso, es la ecuación sobre la malla de la armadura del motor (Chapman, 2012).

$$V_A = R_a i_A + L_a \frac{di_A}{dt} + k_i \omega \quad (22)$$

Como se puede observar, la ecuación relaciona la tensión de entrada de armadura con la corriente de armadura y los parámetros de la armadura (resistencia e inductancia). La tensión de velocidad, $k_i \omega$, se puede descartar ya que se prealimenta al modelo solo de ser necesario. Con esta consideración, se puede diseñar el controlador del sistema. Puesto que la variable que se está derivando es la corriente, y la tensión es la entrada del sistema, se aplica la transformada de Laplace a la ecuación diferencial y se obtiene la función de transferencia que se observa en (23).

$$P_e(s) = \frac{I_A(s)}{V_A(s)} = \frac{1}{R_a + L_a s} \quad (23)$$

$P_e(s)$ se utiliza para denotar la planta eléctrica del sistema, es decir, la planta que el controlador observa. Puede verse que esta planta tiene ganancia $K = 1/R_a$ y constante de tiempo $T = L_a/R_a$. Por otro lado, se tiene que la ecuación del controlador PI estándar tiene la forma de (24).

$$C_e(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (24)$$

La función de transferencia a lazo abierto sería como en (25).

$$L_e(s) = P_e(s) \times C_e(s) = \frac{K_p (T_i s + 1)}{s T_i (R_a + L_a s)} \quad (25)$$

Esta función de transferencia es a lazo abierto, por lo que, al cerrar el lazo se obtiene la función de transferencia que se observa en (26).

$$M_{yr,e}(s) = \frac{L_e(s)}{1 + L_e(s)} = \frac{\frac{K_p (s + T_i)}{s (R_a + L_a s)}}{1 + \frac{K_p s + T_i}{s (R_a + L_a s)}} = \frac{1}{1 + s \frac{(R_a + L_a s)}{(K_p s + T_i)}} \quad (26)$$

Asimismo, se tiene que la función de transferencia a lazo cerrado que se desea debe tener la forma de (27), con $T_{c,e} = 1/2\pi f_{c,e}$ es la constante de tiempo a lazo cerrado del sistema. Esta se ajusta según el valor de f_c que es la frecuencia de corte a lazo cerrado. Para efectos de control de los lazos de corriente, la frecuencia de corte usualmente debe estar entre 100 y 200 Hz, para efectos de este trabajo, la frecuencia se establece en 150 Hz para este lazo.

$$M_{yr,e}^*(s) = \frac{1}{1+T_{c,e}s} = \frac{1}{1+\frac{1}{2\pi f_{c,e}}s} \quad (27)$$

Observando ambas ecuaciones, se observa que para que ambas funciones sean iguales, se debe cumplir que:

$$\frac{R_a + L_a s}{K_p s + T_i} = \frac{1}{2\pi f_{c,e}} \quad (28)$$

Y despejando para K_p y T_i se tiene que:

$$K_p = 2\pi f_{c,e} L_a \quad (29)$$

$$T_i = 2\pi f_{c,e} R_a \quad (30)$$

Una vez que se ha sintonizado este lazo, se procede entonces a sintonizar el lazo externo, que controla la velocidad. Para esto, se parte del análisis mecánico de la máquina. Utilizando la sumatoria de torques de la máquina, y considerando que la aceleración angular es la derivada de la velocidad angular, se tiene la ecuación (31):

$$J \frac{d\omega}{dt} = \tau_e - \tau_L - B\omega \quad (31)$$

El torque electromagnético y la corriente de armadura se relacionan según la ecuación (32):

$$\tau_e = k_t i_a \quad (32)$$

Combinando (31) y (32) aplicando la transformada de Laplace, se obtiene la siguiente función de transferencia electromecánica:

$$P_m(s) = \frac{\omega(s)}{i_a(s)} = \frac{k_t}{B + Js} \quad (33)$$

Donde la constante k_t es la constante de torque del motor. Para este trabajo, se tomó un valor de 0.34 Nm/A. El controlador PI para el sistema mecánico tiene la misma ecuación que el controlador PI para el sistema eléctrico (ecuación (34)):

$$C_m(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (34)$$

Visto desde el punto de vista del lazo de control de la velocidad, el lazo de corriente posee una ganancia unitaria dado que este fue uno de los parámetros de diseño. Para el lazo de velocidad, la frecuencia natural debe estar entre 10 y 20 Hz, es decir, 10 veces menor que el lazo de corriente, ya que, desde el punto de vista de la velocidad de respuesta de los controladores, el controlador de corriente pone su salida casi inmediatamente conforme recibe su consigna de corriente del controlador maestro. Para este trabajo se escogió $f_{c,m} = 15$ Hz. La función de transferencia a lazo cerrado para este sistema también debe tener la forma de la ecuación (35):

$$M_{yr,m}^*(s) = \frac{1}{1 + T_{c,m}s} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2\pi f_{c,m}}s} \quad (35)$$

Y esta se debe igualar con la función de transferencia a lazo cerrado que actualmente se tiene, donde k_t es la constante de torque anteriormente descrita:

$$M_{yr,m}(s) = \frac{L_m(s)}{1 + L_m(s)} = \frac{\frac{k_t(K_p s + T_i)}{s(B + Js)}}{1 + \frac{k_t(K_p s + T_i)}{s(B + Js)}} = \frac{1}{1 + s \frac{(B + Js)}{k_t(K_p s + T_i)}} \quad (36)$$

Y por lo tanto se debe cumplir que:

$$\frac{J/k_t s + B/k_t}{K_p s + T_i} = \frac{1}{2\pi f_{c,m}} \quad (37)$$

Despejando para K_p y T_i se tiene que:

$$K_p = 2\pi f_{c,m} \frac{J}{k_t} \quad (38)$$

$$T_i = 2\pi f_{c,m} \frac{B}{k_t} \quad (39)$$

De esta manera se realiza el control de la máquina de CC con excitación independiente. Se debe notar que, para el caso del lazo de corriente, como se mencionó, el término $k_t\omega$, la tensión de velocidad no intervino en la sintonización, ya que este término se puede prealimentar de ser necesario, es decir, solo si el controlador no está siguiendo las consignas de velocidad como se esperaría.

2.3.2 Control vectorial indirecto con encoder

La técnica de control orientado a campo es una técnica vectorial para el control de motores. El objetivo del control orientado a campo es lograr un tipo similar de controlador con un lazo de control de par interno que haga que el motor responda muy rápido a las demandas de par del circuito de control de velocidad exterior. En el control orientado a campo, se aplica el principio de par desacoplado y control de flujo. Se basa en el control instantáneo de los vectores espaciales de corriente del estator.

El control del motor de inducción es complicado debido al control del par desacoplado y los componentes que producen el flujo de las corrientes de fase del estator. No hay acceso directo a las cantidades del rotor, como los flujos y las corrientes del rotor. Para superar estas dificultades, se desarrollan algoritmos de control de vectores de alto rendimiento que desacoplan las corrientes de fase del estator utilizando solo la corriente del estator, el flujo y la velocidad del rotor medidos (Cárdenas, 2011; Giri, 2013).

La descripción matemática del motor de inducción se basa en la notación del espacio de estados. Al describir un motor de inducción trifásico mediante un sistema de ecuaciones no lineales, se realizan los siguientes supuestos (Giri, 2013):

- El motor trifásico es simétrico.
- Solo se consideran los armónicos fundamentales, mientras que los armónicos superiores de la distribución de campo espacial y de la Fuerza Motriz Magneto (MMF) en el espacio aéreo no se tienen en cuenta.
- Los devanados del estator y rotor distribuidos espacialmente se reemplazan por una bobina concentrada.
- Se descuidan los efectos de la anisotropía, la saturación magnética, las pérdidas de hierro y las corrientes de Foucault.

- En muchos casos, especialmente cuando se considera un estado estable, la corriente y las tensiones eléctricas se consideran sinusoidales.
- La resistencia de la bobina y la reactancia se consideran constantes.

La estrategia de un controlador vectorial de CA es calcular los vectores de corriente individuales para permitir finalmente el control separado de la corriente de flujo y / o la corriente de par en todas las condiciones de velocidad y carga. Al igual que en la unidad de CC, el objetivo es mantener una corriente de flujo constante en el motor.

El cálculo de los vectores de corriente implica la medición de las variables disponibles (como la corriente del estator (I_s), la tensión del estator (V_s), la relación de fase, la frecuencia, la velocidad del eje, etc.) y su aplicación a un "modelo de motor", que incluye las constantes del motor (como la resistencia y la inductancia del estator, la resistencia y la inductancia del rotor, la inductancia de magnetización, el número de polos, etc.). Debido a las muchas variables, hay muchas aplicaciones posibles de un modelo de motor, desde la simple estimación de motor. Cuanto más detallado sea el modelo del motor, más potencia de procesamiento se requiere (Cárdenas, 2011; Giri, 2013).

Por lo tanto, la parte central del sistema de control vectorial es el modelo de motor activo, que modela continuamente las condiciones dentro del motor (Giri, 2013):

- Calcula continuamente en tiempo real la corriente generadora de par implementando las siguientes actividades:
 - Almacena las constantes del motor en la memoria para ser utilizadas como parte del cálculo.
 - Mide la corriente y la tensión del estator en cada fase.
 - Mide la velocidad (con el codificador) o calcula la velocidad (sin codificador).
- Calcula continuamente en tiempo real la corriente que produce el flujo.
- Implementa el bucle de control de velocidad comparando la retroalimentación de velocidad con el punto de ajuste de velocidad para proporcionar una salida de error al bucle de control de par
- Implementa el bucle de control de par comparando el par activo, calculado a partir de la realimentación de velocidad y corriente, para proporcionar una salida de error al controlador.
- Actualiza constantemente esta información y mantiene un control estricto sobre el proceso.

Para una respuesta dinámica adecuada del variador, los cálculos del modelo deben realizarse al menos más de 2000 veces por segundo, lo que da un tiempo de actualización de menos de 0.5 ms. Aunque esto se logra fácilmente con los procesadores modernos de alta velocidad, la capacidad de modelar continuamente el motor de inducción a esta velocidad

Esta transformación es una transformación intermedia, ya que estas variables todavía tienen un comportamiento sinusoidal y de distintas frecuencias, por lo que estas transformadas solo se utilizan directamente en esquemas de control resonante, que no se considera en este trabajo. Para convertir estas variables a variables invariantes en el tiempo, se utiliza la transformada de Park, la cual se representa en la ecuación (42). Como se puede ver, esta transformada consiste en una matriz de rotación que transforma los fasores giratorios del estator en fasores estáticos del entrehierro, ya que, desde el punto de vista relativo, si se ubica el marco de referencia en el entrehierro, los fasores giratorios se moverían a la misma velocidad que el campo magnético, es decir la velocidad sincrónica, por lo que los fasores se verían como si estuvieran fijos en el espacio (Cárdenas, 2011).

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \sin(\theta_e) \\ -\sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (43)$$

En la ecuación (43), se muestra la transformación inversa, para pasar de fasores dq a fasores $\alpha\beta$. También, si se combinan las ecuaciones (40) y (42), y las ecuaciones (41) y (43), se puede pasar directamente del sistema ABC al sistema $dq0$ y viceversa. Esto se muestra en las ecuaciones (44) y (45) (Cárdenas, 2011).

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \sin(\theta_e) \\ -\sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 0 \\ -1/3 & 1/\sqrt{3} \\ -1/3 & -1/\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (45)$$

En este caso, se utiliza la variable X para designar una variable eléctrica que se está convirtiendo, ya sea corriente o tensión. Además, el ángulo θ es el ángulo de referencia eléctrica que se utiliza para la conversión de coordenadas.

Para diseñar los controladores, se tienen las siguientes ecuaciones dinámicas, en los ejes d y q (Cárdenas, 2011):

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \sigma L_s \omega_e i_{sq} + \frac{L_0}{L_r} \frac{d\psi_{rd}}{dt} \quad (46)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \sigma L_s \omega_e i_{sd} + \omega_e \frac{L_0}{L_r} \psi_{rd} \quad (47)$$

Se puede observar que en ambas ecuaciones existen términos cruzados que relacionan la velocidad eléctrica y las corrientes de los otros ejes, por lo que para obtener una estructura de sistema SISO de tal forma que se pueda diseñar el controlador, los términos cruzados, que se consideran como términos de desacoplamiento, se prealimentan al sistema (de ser necesario). Al eliminar los términos de desacoplamiento y aplicarse la transformada de Laplace, se obtienen las siguientes funciones de transferencia (Cárdenas, 2011).

$$P_{e,d}(s) = \frac{V_{sd}}{I_{sd}} = \frac{1}{R_s + \sigma L_s s} \quad (48)$$

$$P_{e,q}(s) = \frac{V_{sq}}{I_{sq}} = \frac{1}{R_s + \sigma L_s s} \quad (49)$$

Donde la constante σ se calcula como (Cárdenas, 2011):

$$\sigma = \frac{L_0^2}{(L_0 + L_{ts})(L_0 + L_{lr})} \approx \frac{L_{lr} + L_{ts}}{L_0} \quad (50)$$

Tal y como se observa, la planta para ambos controladores es la misma, por lo que, basta con sintonizar uno de ellos. En este caso se sintoniza el controlador de la corriente de eje de cuadratura, ya que este es el que controla la velocidad del motor. El valor de la corriente del eje directo se establece en un valor fijo ya que esta es la que controla la intensidad del flujo de campo en el entrehierro de la máquina. Usualmente, esta corriente corresponde a la corriente de la máquina CA cuando opera en vacío. La estructura del controlador PI a utilizar en este caso es igual a la utilizada para controlar la corriente de armadura en el motor de CC.

$$C_e(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (51)$$

Dichos controladores se pueden sintonizar ya sea por métodos algebraicos o por el método del lugar geométrico de las raíces (LGR). Cárdenas (2011) recomienda principalmente utilizar el método del LGR para evitar las complicaciones que pueden originar al realizar la manipulación algebraica de los términos, además de que se puede utilizar la herramienta SI-SOTOOL de MATLAB® para sintonizar el controlador a través del LGR. El autor también establece las siguientes pautas para sintonizar los controladores:

- Error cero en estado estacionario ante una entrada escalón de I_{sd}^* y I_{sq}^* y ω^* .
- Frecuencia natural ω_n (o ancho de banda) adecuada. Para los lazos de corriente se desea que la frecuencia esté entre los 100 y los 200 Hz. Para el lazo de velocidad se busca que la frecuencia esté entre los 10 y los 20 Hz.
- Coeficiente de amortiguamiento ξ o margen de fase adecuado. Se considera que el coeficiente de amortiguamiento debe ser mayor o igual a 0.5. Habitualmente se diseña para $\xi = 0.707$ o $\xi = 0.8$.

Para aplicar el LGR a la sintonización, primero se escribe la función de transferencia de la planta, luego se abre la aplicación *rltool* y se importa dicha función. Posteriormente, en la sección de diseño del LGR, se añaden las condiciones de la frecuencia natural y el coeficiente de amortiguamiento. Con esto, se mueve la ganancia del sistema hasta que los polos de lazo cerrado se ubiquen sobre el límite de frecuencia de corte deseada. Con esto, ya se tienen los parámetros K_p y T_i . Un ejemplo de este tipo de sintonización se muestra en la figura 2.20.

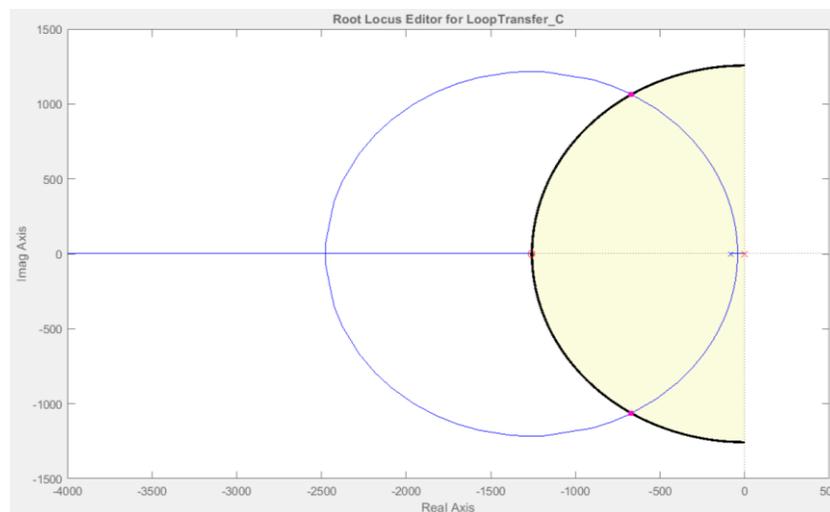


Figura 2.20: Sintonización de controlador por el método del LGR. Generada con MATLAB®.

Una vez que los controladores de corriente se han sintonizado, se procede ahora a sintonizar el controlador de velocidad. Tal como se indicó, este controlador es el que establece la consigna de la corriente del eje cuadratura, por lo que su salida se conecta hacia dicho controlador, siguiendo el esquema de control en cascada. Para la sintonización del

controlador de velocidad, se utiliza una función de transferencia análoga a que se utilizó para el controlador de velocidad del motor de corriente continua:

$$P_m(s) = \frac{\omega_r}{I_{sq}} = \frac{k_t}{Js + B} \quad (52)$$

Como se puede observar, esta función también depende de un parámetro k_t de la máquina, que relaciona la corriente del eje de cuadratura con el torque electromecánico que desarrolla la máquina. Cárdenas (2011), indica que, para efectos prácticos, el valor de k_t se puede calcular como:

$$k_t = \frac{2}{3} \left(\frac{p}{2} \right) \frac{L_0^2}{L_r} i_{sd}^* \quad (53)$$

Este controlador se sintoniza de manera análoga a como se hizo con los controladores de corrientes de los ejes directo y cuadratura. Se utiliza la herramienta *rltool* con esta función de transferencia y se fijan los polos de lazo cerrado en el límite de la frecuencia natural deseada.

2.3.3 Control V/Hz sensorless

El control de Voltios/Hz es de las técnicas de control que se conocen como técnicas escalares. Los motores de CA están diseñados para un campo magnético (flujo) de fuerza constante. La intensidad del campo magnético es proporcional a la relación de tensión (V) a frecuencia (Hz), o V/Hz.

La variación de la frecuencia de la tensión afecta tanto a la velocidad del motor como a la fuerza del campo magnético. Cuando se reduce la frecuencia (para una velocidad del motor más lenta), el campo magnético aumenta y se genera un calor excesivo. Cuando se aumenta la frecuencia (para una mayor velocidad del motor), el campo magnético disminuye y se produce un par menor. Para mantener constante el flujo magnético, la relación V/Hz debe permanecer constante. Esto mantiene la producción de par estable, independientemente de la frecuencia (Bose, 1997).

El control V/Hz de un variador evita esta variación en la intensidad del campo magnético variando la tensión eléctrica junto con la frecuencia, para mantener una relación V/Hz constante. La relación apropiada V/Hz viene dada por la tensión y frecuencia nominales del motor (Allen-Bradley, 2019).

El control V/Hz tradicional no usa retroalimentación, y solo cambia la tensión y la frecuencia al motor en función de un comando de velocidad externo. Para el control de lazo cerrado V/Hz, se agrega retroalimentación del codificador para medir la velocidad real del motor. Se genera una señal de error basada en la diferencia entre la velocidad real y la velocidad ordenada, y el controlador genera un nuevo comando de frecuencia para compensar el error. Si bien mejora la regulación de la velocidad, el control V/Hz de lazo cerrado no es común debido al costo y la complejidad adicionales del codificador y el hardware de retroalimentación (Bose, 1997).

El control V/Hz es un método simple y de bajo costo para controlar unidades de frecuencia variable, y generalmente se considera como el esquema de control VFD más común. Es adecuado tanto para aplicaciones de par constante como de par variable, y se proporciona hasta el 150 por ciento del par nominal a velocidad cero para el arranque y las cargas máximas. La regulación de la velocidad está en el rango de 2 a 3 por ciento de la frecuencia nominal máxima, por lo que este método no es adecuado para aplicaciones donde el control preciso de la velocidad es crítico. El uso más común para el control de V/Hz es conducir equipos industriales como ventiladores y sopladores (Bose, 1997).

Una ventaja única del control de V/Hz sobre otros métodos es que permite que más de un motor sea operado por un solo VFD. Todos los motores arrancarán y pararán al mismo tiempo, y todos funcionarán a la misma velocidad, lo que es beneficioso en algunas aplicaciones de procesamiento, como calefacción y refrigeración.

2.3.4 Comparación entre los métodos de control de motores

Ya se ha expuesto que, existen distintas técnicas de control tanto para motores CC como CA, lo correspondiente ahora sería observar algunas ventajas o desventajas que presentan entre sí. La tabla 2.2 muestra los porcentajes de precisión de velocidad y el transitorio del par para distintas tecnologías de control que se utilizan en motores. Como se observa, el método menos preciso en cuanto a la velocidad es el control de volt/Hertz para el caso sensorless, mientras que el más preciso es el “campo orientado” con un encoder (Rockwell Automation, 2001).

Por otro lado, en lo que respecta al par, se observa que también el método de Volt/Hertz sensorless es el que cuenta con el mayor transitorio de torque, mientras que los métodos de “campo orientado” son los que tienen el menor tiempo. Esto es importante, ya que, por un lado, sí se desea un control muy preciso de la velocidad, la aceleración o la posición, el uso de este método, no sería el más adecuado. Además, el transitorio del torque es de aproximadamente 0.1 segundos, lo cual es crítico en aplicaciones que requieran pasar de un nivel de torque de salida a otro en un período de tiempo breve (Rockwell Automation, 2001).

Tabla 2.2: Comparación de las tecnologías de control empleadas en motores de CC y CA (Rockwell Automation, 2001).

| Parámetro | Variador CC con encoder | Flujo vectorial V/Hz sensorless | Campo orientado con encoder |
|---------------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Exactitud de la velocidad | 0.01% | 1.0% | 0.001% |
| Respuesta del torque (ms) | 10-20 | 100 | 1-10 |

Por otro lado, se observa que el método del campo orientado es el más preciso y es de los que tiene un transitorio del par muy bajo, de máximo 0.01 segundos, lo que hace que pasar de un nivel de torque a otro sea muy rápido. Esto es muy beneficioso en todos los aspectos. Una mala elección del método de control o del motor a utilizar conlleva serios problemas, especialmente si se trata de un entorno industrial (Rockwell Automation, 2001).

2.4 Tipos de cargas mecánicas

Otro aspecto muy importante que se debe tomar en cuenta, son los tipos de carga que manejará el motor. Las cargas se clasifican, de manera general, en cargas de par constante y cargas de par variable.

2.4.1 Cargas de par constante

El par requerido por la carga es constante en todo el rango de velocidad. Las cargas de estos tipos son esencialmente cargas de fricción, tales como bombas de desplazamiento positivo, mezcladoras, bandas transportadoras, grúas, molinos, extrusoras. La figura 2.21 muestra el par constante y su efecto sobre la potencia demandada por este tipo de cargas. También se requiere un par constante cuando se encuentran cargas de choque, sobrecargas o cargas de alta inercia (Elvatron, 2018).

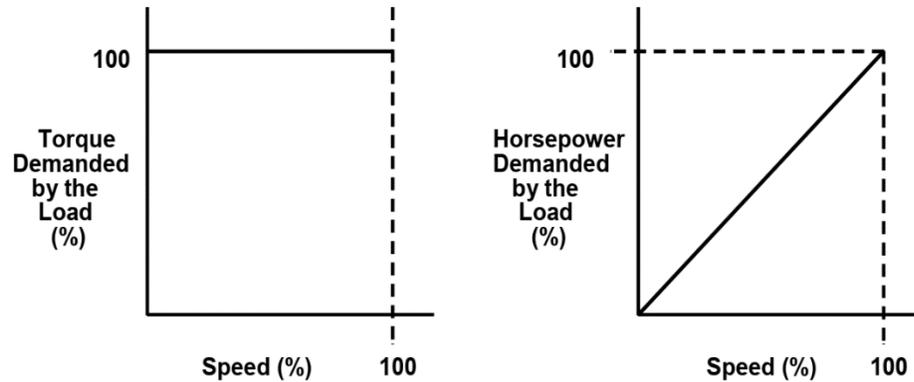


Figura 2.21 Curvas de potencia y par con respecto a la velocidad para una carga de par constante (Rockwell, 2001).

2.4.1.1 Extrusoras de plástico

Ahora que se han explicado los tipos de cargas mecánicas que se utilizan con motores eléctricos, dado que el trabajo se centra en las extrusoras de plástico es adecuado hacer también una mención acerca de este tipo de máquinas, sus características y usos.

La extrusión se define como el proceso de hacer un producto al forzar un material a través de un orificio para que tome una forma, o alternativamente, la producción de bienes finalizados o semi finalizados, usando una extrusora. Los plásticos, y especialmente los termoplásticos de los materiales que principalmente se utilizan con estos equipos, tanto que alrededor del 65% del plástico que se consume se considera que ha sido procesado por una extrusora. Los equipos de extrusión, comúnmente llamados extrusoras, generalmente son de dos tipos: simples y gemelas, según si tienen uno o dos tornillos para realizar la extrusión (Dynisco, s.f.).

Las extrusoras simples suelen ser las más comunes ya que son relativamente simples, baratas y proporcionan un producto de salida de manera bastante continua y fácil. Una extrusora de este tipo se muestra en la figura 2.22.

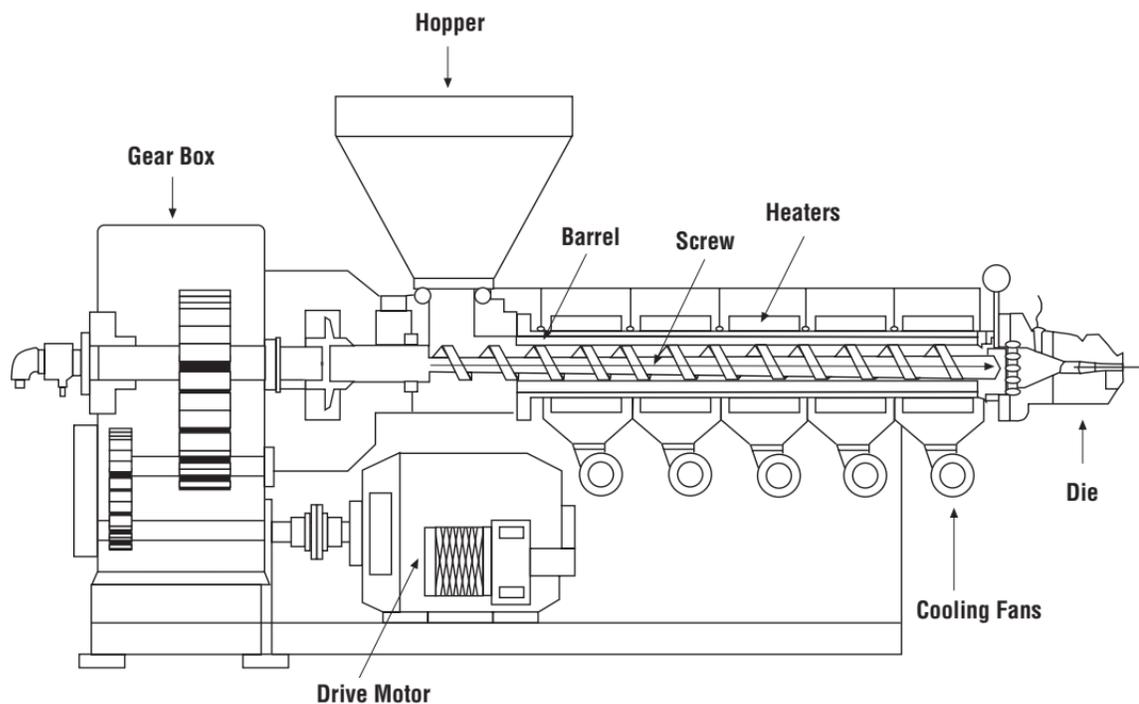


Figura 2.22: Extrusora simple (Dynisco, s.f.).

Como puede observarse, la máquina utiliza un motor que hace girar el tornillo de extrusión. El material se inserta por la tolva, la entrada superior de la máquina. Una vez dentro de la extrusora, el material se empieza a calentar. Esto se hace con el fin de suavizarlo y así pueda moldearse de forma más fácil. Mientras el material se calienta, va siendo movido por el tornillo, hacia el final de la máquina, donde se le da la forma que se desea, o, en algunos casos, por algún equipo adicional que se coloca después del final de la extrusora, que le da la forma final al material. El producto luego se deposita en un contenedor con el fin de que se pueda enfriar y conserve la forma que se le ha dado (Dynisco, s.f.).

Entre los principales productos que se pueden obtener de este proceso están (Dynisco, 2011):

- Materia prima para otros procesos que implican plásticos.
- Película plástica.
- Tuberías sólidas y flexibles
- Aislamientos para conductores eléctricos.
- Perfiles para puertas y ventanas.

- Filamentos.
- Hojas.
- Redes

Las extrusoras gemelas, o de tornillos de extrusión gemelos, como su nombre lo indica, poseen dos tornillos de extrusión, por lo que se utilizan en procesos donde se requiera más de un tornillo de extrusión, especialmente si se requiere combinar materias primas para alcanzar el producto final. Los tornillos pueden rotar en la misma dirección o en dirección contraria, así como también puede pasar que los tramos de los tornillos puedan entrelazarse o no. Estas extrusoras se utilizan en procesos donde se pueda ocupar un paso de mezclado junto con uno de extrusión, como por ejemplo cuando se procesa cloruro de polivinilo no plastificado (UPVC), del cual se puede obtener tuberías y perfiles. Una imagen de este tipo de equipos se muestra en la figura 2.23 (Dynisco, 2011).

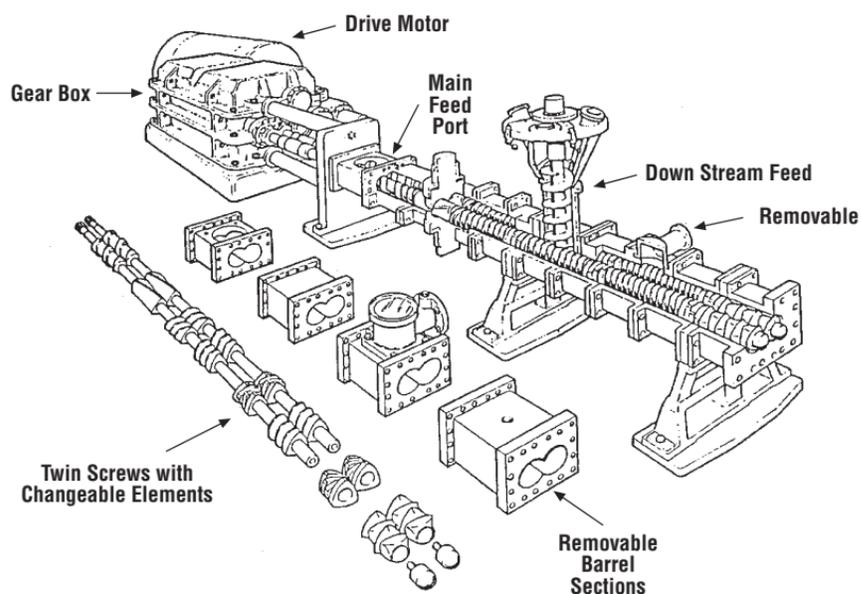


Figura 2.23: Extrusora gemela o de tornillos gemelos (Dynisco, 2011).

Al tratarse de una carga mecánica de par constante, es de esperar que su curva par velocidad sea similar a la mostrada en la figura 2.21. En la figura 2.24 se muestra la curva par velocidad de una extrusora al procesar un compuesto de almidón de maíz, glicerol y agua. Como se puede observar, la curva tiende a tener un pequeño transitorio al inicio, indicando un par mayor, y luego llega a un estado estacionario, en el cual, el torque se mantiene aproximadamente constante para todos los intervalos de velocidad, lo cual muestra que, efectivamente, esta máquina se comporta como una carga mecánica de par constante

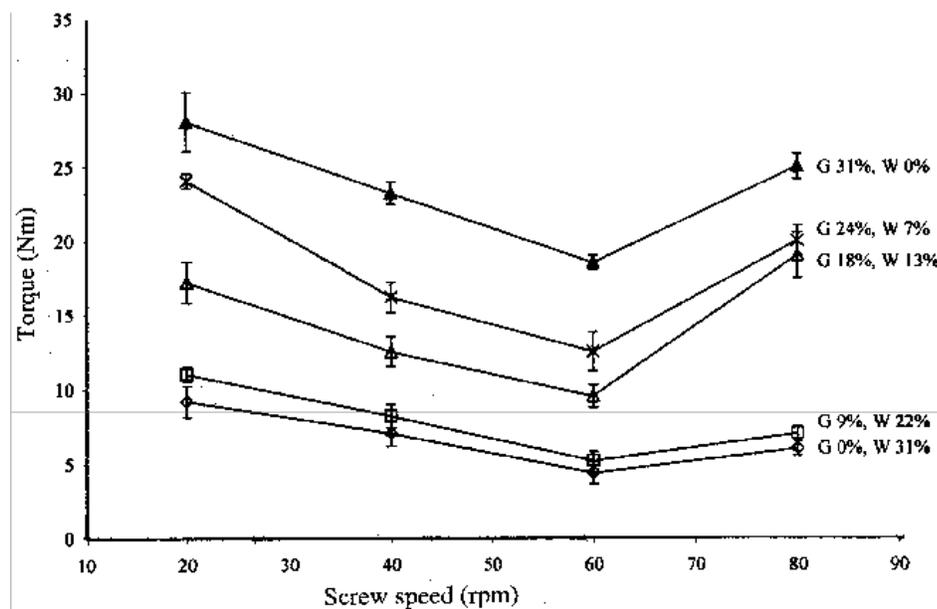


Figura 2.24: Curva par-velocidad de una extrusora, según el tipo de polímero que procesa (Das, 2008).

2.4.2 Cargas de par variable

En este tipo de cargas, la demanda de torque incrementa la velocidad, en proporción cuadrática. La potencia incrementa de forma cúbica con respecto a la velocidad. Ejemplos de cargas que exhiben características de par de carga variable son ventiladores centrífugos, bombas y sopladores. Este tipo de carga requiere un par mucho más bajo a bajas velocidades que a altas velocidades. En la figura 2.25 se muestra el comportamiento de la potencia y el torque con respecto a la velocidad para este tipo de cargas (Elvatron, 2018).

La clasificación de la operación de los motores en par variable y par constante, recibe también los nombres de “normal duty” (ND) y “heavy duty” (HD), respectivamente, y, asimismo, son indicativos también, de cuanta sobrecarga soporta el variador. La operación de ND se debe a que el variador de velocidad debe soportar un 110% de la corriente nominal del motor durante 60 segundos, o un 150% de la corriente nominal durante 3 segundos. Asimismo, la operación en HD es para aplicaciones más severas, e implica que el variador debe soportar el 150% de la corriente nominal del motor durante 60 segundos o el 200% de la corriente nominal durante 3 segundos. Se debe mencionar también que estas condiciones de

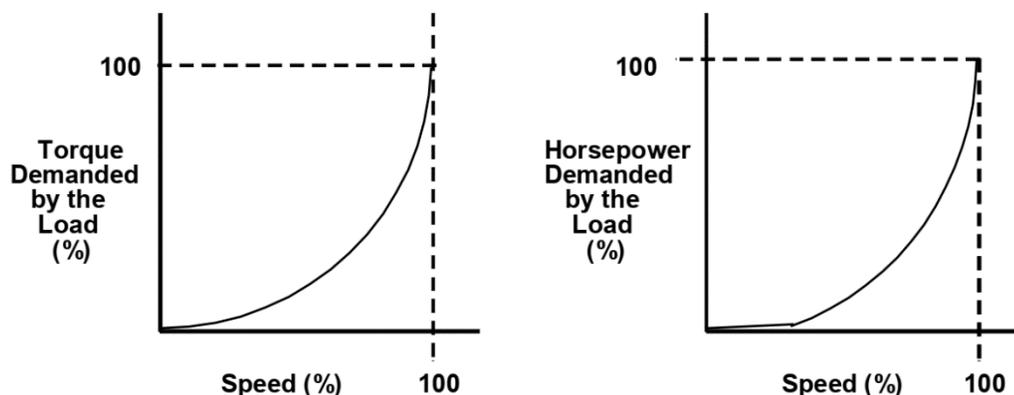


Figura 2.25: Curvas de par y potencia para una carga de par variable (Rockwell Automation, 2001).

operación se deben repetir solamente en intervalos de 10 minutos, con el fin de que el variador no se esté desconectando por una sobrecarga (Rockwell Automation, 2001).

2.5 Aspectos eléctricos y mecánicos durante los reemplazos

Cuando se realizan reemplazos de motores de CC por motores de CA con nuevos sistemas de control, es importante considerar los aspectos eléctricos que van a acompañar a dicha migración. Los sistemas de CC no solo se diferencian de los sistemas de CA por la alimentación que utilizan, sino porque también poseen algunas características mecánicas, además del torque y la velocidad, que el motor de CA tiene que intentar igualar.

2.5.1 Aspectos Eléctricos

Al realizar una sustitución de un sistema CC a uno CA, se deben tener en cuenta algunos aspectos importantes que se deben considerar al pasar de un sistema a otro.

Para reemplazar un viejo controlador de CC con un nuevo controlador de vector de CA y motor de inducción, se deben considerar las características de la carga. En general, si el par de arranque es inferior al 150%, y es predecible, entonces una unidad de vector de CA de potencia equivalente es un reemplazo adecuado para la unidad de CC (Kulak et. al., 2002).

La elección de un variador vectorial de CA no estaba disponible sino fue a partir de la década de los ochenta del siglo pasado cuando los variadores de CC se usaban ampliamente; como resultado, los motores de CC se habrían visto sometidos a entornos ambientales hostiles que reducían la vida mecánica del motor de CC. Ahora, un robusto motor de inducción y un variador vectorial de CA proporcionarán un mantenimiento bajo y una solución confiable para operar motores en condiciones industriales severas.

Una combinación de accionamiento vectorial y motor de inducción generalmente será más costosa. Sin embargo, cuando se considera el aumento de la vida útil del motor de inducción en entornos operativos hostiles y los costos de mantenimiento reducidos al no tener conmutación mecánica, la combinación del motor de inducción y el motor de vector proporcionará una solución para maximizar la producción y minimizar el tiempo de inactividad para el mantenimiento (Kulak et. al., 2002).

Otros aspectos importantes que se deben tomar en cuenta para realizar las migraciones son (Rockwell Automation, 2001):

1. Tensión de línea: esta se relaciona mucho con la relación V/f , ya que esto permite mantener el flujo de campo que se produce en el motor en un valor constante, especialmente cuando se aplica la técnica de control V/Hz que tendría principalmente el variador de velocidad, y que será el que le llegaría al motor de corriente alterna. También puede afectar el torque de arranque, especialmente cuando se realiza control de torque y se utilizan arrancadores suaves.

Este dato también es sumamente importante a la hora de especificar el variador de velocidad que se va utilizar en conjunto con el nuevo motor CA, ya que estos deben ser de la misma tensión nominal de línea a línea.

2. Muchas aplicaciones CC poseen retroalimentación de encoder o tacómetro, es otro aspecto a revisar previo al cambio. La retroalimentación de la velocidad del motor es importante, especialmente según sea el esquema de control que se haya escogido para el motor.
3. Rangos de velocidad en los que opera la aplicación y verificar si es normal duty o heavy duty, ya que, según sea el tipo de carga que va a manejar, la relación par-velocidad es fundamental para el adecuado manejo de la carga. Para el caso de este trabajo, que se centra en extrusoras de plástico, estas se consideran como cargas de par constante, es decir, heavy duty.
4. Se debe verificar la potencia del transformador “aguas arriba” del variador vectorial, ya que esto puede significar que se deben instalar reactores de línea. Esto debido a que los variadores de velocidad, dependiendo de la marca y la potencia nominal del variador, se requiere que el transformador que lo vaya a alimentar tenga una potencia nominal no muy elevada, ya que esto puede hacer que haya una diferencia significativa en la impedancia del transformador y los cables que alimenten al variador.

2.5.1.1 Onda reflejada en sistemas CA con variadores de velocidad

En CA es importante considerar el efecto de la onda reflejada en equipos de CA desde el variador de velocidad hasta el motor, es decir, la longitud del conductor que los conectaría. La onda reflejada ocurre cuando se utiliza un cable muy largo para conectar el variador con el motor; la reactancia del cable es directamente proporcional a la longitud de este, por lo que, a mayor longitud, mayor impedancia. Cuando los pulsos del VFD llegan al motor, es

posible que encuentren una impedancia mayor que la del cable, lo cual hace que los pulsos se reflejen de regreso hacia el variador, y puede suceder que uno de los pulsos enviados desde el variador se sume con uno de los pulsos reflejados, aumentando la magnitud de tensión del pulso. Puede existir hasta 2 dos veces la tensión en los terminales del motor de línea a línea (Collins, 2016).

Usualmente, la forma más fácil de detectar que se tiene un problema de onda reflejada, es cuando se experimenta alguna corriente anómala en el hardware, especialmente en el variador o cuando se dan corrientes de falla similares a las que se dan cuando se arranca el controlador que hacen que este se desconecte (Rockwell Automation, 2017).

El problema con las ondas reflejadas es que los picos de voltaje pueden ionizar el aire en el espacio de aire entre los devanados del motor, así como el aire entre el aislamiento del cable y la cubierta del cable, provocando una descarga parcial o corona. El punto en el que esta ionización provoca la formación de un arco a través de los devanados del motor (o a través de los conductores del cable) se conoce como voltaje de inicio de corona (CIV por sus siglas en inglés). Cuando se alcanza el CIV del motor, el aislamiento de los devanados del motor puede dañarse o incluso fallar. Cuando se alcanza el CIV del cable, se puede producir un cortocircuito y el cable se puede dañar permanentemente (Collins, 2016).

La forma más eficaz de prevenir la aparición de ondas reflejadas y sobretensiones es mantener la longitud del cable más corta que el máximo recomendado por el fabricante. En los casos en que no sea posible reducir la longitud del cable, existen soluciones de hardware, como reactores de salida, filtros y dispositivos de terminación, que pueden reducir o eliminar las ondas reflejadas, protegiendo el motor y el cable de daños (Collins, 2016).

2.5.1.2 Frenado Regenerativo y variadores de frente activo

Si la aplicación es de frenado regenerativa, es decir que, desde el punto de vista del inversor, el frenado se logra de manera similar al frenado dinámico. Cuando se requiere el frenado, la frecuencia de salida del inversor se reduce a un nivel por debajo de la velocidad real del rotor. La ruta para la potencia de frenado es desde el motor a través de los diodos conectados inversamente del inversor, hacia el condensador del bus de corriente continua, que aumenta su tensión (Rockwell Automation, 2001).

Normalmente, para mitigar este efecto, los VFD se construyen con una resistencia de frenado. Un circuito tipo “chopper” compuesto de un transistor y un diodo que están diseñados para que, en caso de que la tensión de los capacitores de enlace sea mayor que cierto umbral, el transistor pasa al modo de conducción y el exceso de corriente de los capacitores empieza a fluir hacia la resistencia, de tal forma que el exceso de energía se disipa como calor (Bullick, 2016).

Otra posible solución para este problema es la utilización de variadores de frente activo o regenerativos, especialmente si gran parte del ciclo de trabajo es del tipo regenerativo. Esto

no aplica para el caso de las extrusoras, que son el caso de estudio de este trabajo, aunque, no está demás mencionar este hecho ya que ese es el caso de otras cargas tales como grúas o centrifugadoras.

2.5.2 Aspectos Mecánicos

En cuanto a la parte mecánica, existen también algunos detalles que se deben considerar a la hora de cambiar los motores. Aunque la parte eléctrica es importante, también se debe considerar el tamaño de la carcasa (“frame” en inglés) para que sea el mismo en CA, y se pueda acoplar bien a la carga o buscar una solución alterna. También se debe tomar en cuenta el encerramiento (“enclosure”), ya que esto puede afectar principalmente el desempeño del motor, debido a efecto de calentamiento, y esto puede conllevar a un daño serio del motor. El acople que se utilice para conectar la flecha del motor con la carga también es un aspecto relevante, ya que todos los acoples tienen características mecánicas y elásticas distintas, y se debe escoger el acople que mejor se ajuste a las condiciones de velocidad y torque que existían en el sistema anterior. El calor generado dentro de un motor se transfiere al entorno externo principalmente por la radiación de la superficie de la carcasa. En consecuencia, el área de superficie debe ser lo suficientemente grande como para disipar el calor generado internamente sin permitir que la temperatura interna exceda los límites nominales.

2.5.2.1 Acoples Mecánicos

El primer punto que se debe considerar está en los acoples de los motores. Los acoples son las partes empleadas para conectar el eje del motor con la carga, y se encarga de transmitir la potencia de salida del motor hacia la carga (Valverde, 2018). Existen varios tipos de acoples, que dependen tanto de la forma como del material del cual están fabricados o de la forma que poseen y la carga a la cual se conectan.

Uno de los puntos más importantes en cuánto a los acoples se refiere es calcular el torque adecuado. Para calcularlo, uno se basa en la pregunta “¿Qué tanto torque se tiene que transmitir?”. Dependiendo del acople que se vaya a elegir, los fabricantes tienen tablas de aplicaciones y con ellos se determina un factor de servicio (Valverde, 2018). Para calcular el torque que se requiere se utiliza la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{63025 \times hp \times SF}{rpm} \quad (54)$$

En esta ecuación, el torque que se obtiene está en lb in, que es la unidad de medida estadounidense para el torque, y es en la cual muchos fabricantes de estos equipos especifican el torque máximo que pueden soportar. El factor de servicio SF se determina a partir de las tablas del fabricante.

Otros aspectos importantes que se deben considerar son el desalineamiento que pueda haber entre los ejes del motor y la carga, el mantenimiento, la densidad de potencia, la compatibilidad química, la temperatura en el ambiente de trabajo y el tipo de montaje y el espacio entre ejes, así como también los diámetros de los ejes que se van a acoplar (Valverde, 2018).

Los acoples se catalogan en dos principales categorías: flexibilidad del material y flexibilidad mecánica (Holtz, s.f.). Los acoples flexibles obtienen su característica debido a la compresión o dilatación de algún material elástico, tal como el caucho. También se puede obtener alguna flexibilidad cuando las partes del acople pueden desplazarse, ya sea en algún movimiento traslacional o rotacional entre partes del mismo acople. Por lo general, los acoples que poseen una gran flexibilidad, requieren un menor mantenimiento. Los acoples metálicos requieren mayor mantenimiento, especialmente en cuanto a lubricación se trata. Los acoples se detallan en el anexo AN.1.

2.5.2.2 Alineamientos

El siguiente punto que es importante mencionar en la parte mecánica sería el alineamiento de los ejes del motor y la carga. Existen 3 tipos de desalineación que se pueden dar entre los ejes de un motor y la carga que este maneja:

- Desalineación angular: Ocurre cuando el motor se coloca en un ángulo con respecto al equipo accionado. Si las líneas centrales del motor y los ejes del equipo accionado se extendieran, se cruzarían entre sí, en lugar de superponerse o correr a lo largo de una línea central común. La desalineación angular, en particular, puede causar daños graves al equipo accionado y al motor (Dpto. de Energía de EUA, 2012).
- Desalineación paralela: Ocurre cuando las dos líneas centrales del eje son paralelas, pero no en la misma línea. Hay dos planos de desalineación paralela, ya que los ejes pueden estar desplazados horizontalmente (desplazados hacia la izquierda o hacia la derecha), verticalmente (colocados en diferentes elevaciones) o ambos (Dpto. de Energía de EUA, 2012).
- Desalineación axial: significa que los dos extremos de cada eje, o eje, no se encuentran. Son paralelos, pero cuando están completamente extendidos, los extremos no se unen. Este tipo de desalineación también se puede llamar flotación final porque los extremos de los ejes “flotan” pero no se conectan, lo que significa que pueden entrar y salir (Mar Dustrial Inc., 2011).

En la figura 2.26 se muestra cada tipo de desalineación.

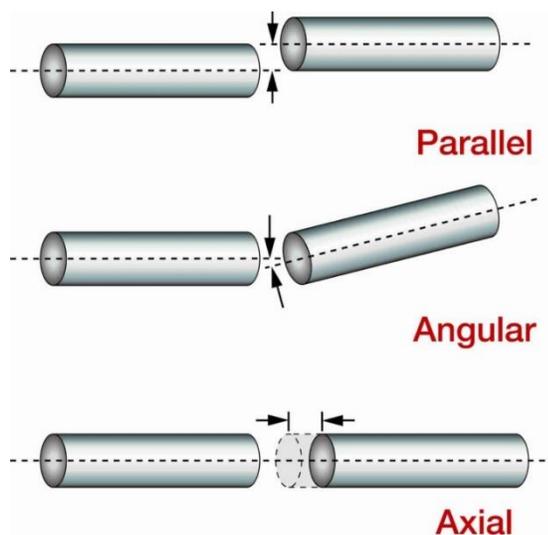


Figura 2.26: Tipos de desacoples entre ejes (Bonanomi, 2015)

El objetivo de optimizar la alineación del eje es aumentar la vida útil de la maquinaria rotativa. Para lograr este objetivo, los componentes que tienen más probabilidades de fallar deben fabricarse para operar dentro de sus límites de diseño aceptables. Si bien la desalineación no tiene un efecto medible en la eficiencia del motor, la alineación correcta del eje asegura la transmisión suave y eficiente de la potencia desde el motor al equipo impulsado. La alineación incorrecta ocurre cuando las líneas centrales del motor y los ejes del equipo impulsado no están alineadas entre sí. La desalineación produce vibración excesiva, ruido, aumento de temperatura del acoplamiento y del cojinete, y fallas prematuras del eje, del acoplamiento o del cojinete (Dpto. de Energía de EUA, 2012).

Los motores más grandes suelen estar acoplados directamente a sus cargas con acoplamientos rígidos o flexibles. Los acoplamientos rígidos no compensan ninguna desalineación entre el motor y el equipo accionado, mientras que los acoplamientos flexibles toleran pequeñas cantidades de desalineación. Los acoplamientos flexibles también pueden reducir la vibración transmitida de un equipo a otro, y algunos pueden aislar el eje del equipo impulsado contra corrientes eléctricas parásitas. Incluso los acoplamientos flexibles tienen requisitos de alineación, definidos en la hoja de instrucciones del acoplamiento (Dpto. de Energía de EUA, 2012).

No existe ningún estándar industrial sobre alineación. La alineación adecuada del eje es especialmente crítica cuando el motor funciona a altas velocidades. Las normas estándar de la industria para las tolerancias de alineación se citan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Tolerancias para alineación de ejes para ejes acoplados directamente (Dpto. de Energía de EUA, 2012)

| Velocidad del motor (rpm) | Desalineamiento paralelo (mm) Acoples cortos flexibles | | Desalineamiento angular (mm por in), Acoples espaciadores | |
|---------------------------|---|-----------|---|-----------|
| | Excelente | Aceptable | Excelente | Aceptable |
| 900 | 3 | 6 | 1.2 | 2 |
| 1200 | 2.5 | 4 | 0.9 | 1.5 |
| 1800 | 2 | 3 | 0.6 | 1 |
| 3600 | 1 | 1.5 | 0.3 | 0.5 |

En la práctica, es difícil lograr una alineación adecuada sin utilizar equipos de alineación como indicadores de cuadrante o herramientas de alineación láser. El procedimiento correcto de alineación del eje es asegurar el equipo impulsado primero porque mover una bomba, por ejemplo, podría tensionar la tubería de conexión. A continuación, instale el acoplamiento al equipo impulsado. Luego, el motor debe colocarse en la alineación adecuada y unirse al acoplamiento (Dpto. de Energía de EUA, 2012).

Después de que el equipo haya funcionado el tiempo suficiente para estabilizar la temperatura, apáguelo y vuelva a verificar la alineación inmediatamente. Debido al crecimiento térmico, las máquinas que están alineadas en la condición previa a la operación “fría” casi siempre están desalineadas cuando se alcanzan las temperaturas de operación. Muchos fabricantes de equipos publican valores de compensación térmica para que el técnico de alineación pueda corregir el crecimiento térmico durante el proceso de alineación inicial (Dpto. de Energía de EUA, 2012).

2.5.2.3 Montajes y posición del motor

Los montajes son otro aspecto importante que se debe considerar cuando se están reemplazando los equipos, especialmente el motor. Esto también va muy de la mano con el tema de los desalineamientos que se pueden dar entre los ejes de la carga y el motor. La instalación y la posición de montaje adecuadas del motor son esenciales para obtener un funcionamiento de máxima calidad, un rendimiento eficiente y la máxima fiabilidad. A veces, sin embargo, existe confusión sobre las diferentes formas en que se puede instalar un motor (Drives and Automation, s.f.).

Hay dos estándares diferentes, NEMA e IEC, que verá cuando observe las posiciones de montaje del motor eléctrico. Aunque generalmente son comparables, existen ligeras diferencias entre los dos. La posición de montaje IEC estándar coloca la caja de conexiones en la parte superior del motor, conocida como posición de montaje IM B3 en el marco IEC (o F3 en los marcos NEMA). Por otro lado, la posición de montaje estándar NEMA se conoce como F1, con la caja de conexiones / conductos ubicada en el lado izquierdo del motor mirando hacia el eje de salida (Drives and Automation, s.f.).

El diseño de la mayoría de los motores es tal que por lo general se pueden operar en muchas posiciones de montaje, a menos que se indique lo contrario. Sin embargo, algunas posiciones de montaje requieren modificaciones de construcción adicionales para lograr un rendimiento óptimo. Por ejemplo, las aplicaciones al aire libre de eje hacia arriba o hacia abajo pueden requerir la perforación de orificios de drenaje adicionales, cubiertas de goteo y cojinetes más fuertes para soportar cargas pesadas. No se debe asumir que se puede atornillar cualquier motor en cualquier orientación (Drives and Automation, s.f.).

En el anexo AN.3 se muestran los montajes típicos en ambos estándares, tanto NEMA como IEC.

2.5.2.4 Encerramientos

Otro punto importante en cuanto a la parte mecánica del reemplazo de los motores es el encerramiento o carcasa del motor. La carcasa del motor debe proteger los devanados, cojinetes y otras partes mecánicas de la humedad, los productos químicos, los daños mecánicos y la abrasión de la arena. El estándar NEMA establece poco más de 20 tipos de encerramientos para motores eléctricos. Sin embargo, para efectos prácticos, existen 7 tipos de encerramientos que son los más comunes. Un resumen de estos encerramientos se muestra en el anexo AN.2.

La descripción del gabinete NEMA es similar al código del índice de protección (IP) IEC. Las designaciones NEMA son más descriptivas y generales, mientras que los códigos IP de IEC son más precisos y están definidos de manera más estricta por un código de 2 dígitos, con el primer dígito definiendo qué tan bien protegido está el motor de objetos sólidos y el segundo dígito describe qué tan bien protegido está el motor. motor es de la humedad (Edvard, 2013).

2.5.2.5 Grados de Protección

De manera similar al apartado anterior, se estudian también los grados de protección que establece la IEC, específicamente en su estándar IEC-60529, el cuál es una guía que asigna un código de la forma *IP-XY*, donde *IP* significa Ingress Protection y *XY* son un par de dígitos de tal manera que *X* representa el grado de protección del equipo ante la entrada de sólidos, y la *Y* representa el grado de protección del equipo ante líquidos.

Los objetos extraños sólidos pueden ser cualquier cosa, desde dedos hasta herramientas, polvo y cualquier cosa entre ellos. Saber qué grado de protección proporciona la carcasa debe ser una parte clave de la planificación de la salud y la seguridad tanto para los equipos existentes como para las nuevas compras. En la tabla 2.4 se muestra un resumen de los grados de protección para sólidos (Drives and Automation, s.f.).

Tabla 2.4: Detalles de los grados de protección contra sólidos según el estándar IEC-60529 (Drives and Automation, s.f.).

| Grado de Protección | Tamaño del objeto contra el cual protege | Efectivo contra |
|---------------------|--|--|
| 0 | No protegido | No ofrece protección contra el contacto o ingreso de objetos |
| 1 | >50 mm | Cualquier superficie grande del cuerpo, como el dorso de la mano, pero sin protección contra el contacto deliberado con una parte del cuerpo. |
| 2 | >12.5 mm | Dedos u objetos similares. |
| 3 | >2.5mm | Herramientas, alambres gruesos, etc. |
| 4 | >1mm | La mayoría de cables, tornillos, etc. |
| 5 | Protegido contra el polvo | La entrada de polvo no se evita por completo, pero no debe entrar en cantidad suficiente para interferir con el funcionamiento satisfactorio del equipo, protección completa contra el contacto. |
| 6 | A prueba de polvo | Sin entrada de polvo; protección completa contra el contacto. |

El segundo dígito hace referencia a la protección contra líquidos. En la tabla 2.5 se resumen los grados de protección contra líquidos según el estándar de la IEC.

Tabla 2.5: Detalles de los grados de protección contra líquidos según el estándar IEC-60529 (Drives and Automation, s.f.).

| Nivel de Protección | Tipo de protección | Efectivo contra |
|---------------------|--|---|
| 0 | No protegido | - |
| 1 | Agua goteando | El goteo de agua (gotas que caen verticalmente) no tendrá ningún efecto dañino. |
| 2 | Agua goteando cuando se inclina hasta 15 ° | El agua que gotea verticalmente no debe tener ningún efecto dañino cuando el gabinete se inclina en un ángulo de hasta 15 ° desde su posición normal. |
| 3 | Rociado de agua | El agua que cae en forma de rocío en cualquier ángulo hasta 60 ° de la vertical no tendrá ningún efecto dañino. |
| 4 | Salpicaduras de agua | El agua que salpique contra la carcasa desde cualquier dirección no tendrá ningún efecto dañino. |

| | | |
|---|--------------------------|--|
| 5 | Chorro de agua normal | El agua proyectada por una boquilla (6,3 mm) contra el recinto desde cualquier dirección no tendrá efectos nocivos. |
| 6 | Chorro de agua potente | El agua proyectada en chorros de gran alcance (boquilla de 12,5 mm) contra la carcasa desde cualquier dirección no debe tener efectos nocivos. |
| 7 | Inmersión de hasta 1 m | No será posible la entrada de agua en cantidades nocivas cuando el encerramiento se sumerja en agua en condiciones definidas de presión y tiempo (hasta 1 m de inmersión). |
| 8 | Inmersión superior a 1 m | El equipo es adecuado para inmersión continua en agua en las condiciones que especificará el fabricante. Normalmente, esto significará que el equipo está sellado herméticamente. Sin embargo, con ciertos tipos de equipos, puede significar que el agua puede entrar, pero solo de tal manera que no produzca efectos nocivos. |

2.5.2.6 Rodamientos

Los rodamientos son conjuntos mecánicos que constan de elementos rodantes y, por lo general, pistas internas y externas que se utilizan para aplicaciones de ejes lineales o giratorios, y existen varios tipos diferentes de rodamientos, incluidos rodamientos de bolas y de rodillos, rodamientos lineales, así como versiones montadas que pueden utilizar cojinetes de elementos rodantes o cojinetes lisos. Los rodamientos de bolas tienen elementos rodantes esféricos y se utilizan para aplicaciones de carga más baja, mientras que los rodamientos de rodillos usan elementos rodantes cilíndricos para los requisitos de carga más pesada. Los cojinetes lineales se utilizan para movimientos lineales a lo largo de ejes y también pueden tener capacidades de rotación.

Los rodamientos montados son conjuntos en los que los rodamientos se preensamblan en montajes que, a su vez, se atornillan a marcos, montantes, etc., y se utilizan para soportar los extremos de ejes, rodillos transportadores, etc. Además de bolas y rodillos cojinetes en sus formas radiales, lineales y montadas, los cojinetes incluyen aquellos para aplicaciones de ingeniería civil, que se denominan cojinetes deslizantes; los utilizados en pequeños instrumentos y similares, conocidos como cojinetes de joyas; y cojinetes muy especializados conocidos colectivamente como cojinetes sin fricción que incluyen variedades neumáticas y magnéticas. Los cojinetes de manguito, los cojinetes lisos y otros cojinetes de película de fluido se tratan en la familia de los bujes (THOMAS, s.f.).

Se debe también mencionar que los rodamientos que ha de llevar el motor deben estar en función de la carga que este va a manejar, que, desde este punto de vista se catalogan como axiales o radiales. Las cargas axiales también conocidas como de empuje, son cargas

que actúan en paralelo al eje en el que está montado el rodamiento. Por otro lado, las cargas radiales se definen como carga que se aplican perpendicularmente al eje (Nyberg, 2006).

A continuación, se describen con más detalle los tipos más comunes que se utilizan para los motores eléctricos (THOMAS, s.f.):

- **Rodamientos de bola:** Los rodamientos de bolas son conjuntos mecánicos que consisten en elementos esféricos rodantes que se capturan entre pistas circulares internas y externas. Proporcionan un medio para soportar ejes giratorios y minimizar la fricción entre ejes y miembros estacionarios de la máquina. Los rodamientos de bolas se utilizan principalmente en maquinaria que tiene ejes que requieren soporte para una rotación de baja fricción. Hay varias configuraciones, sobre todo blindadas o selladas. Los rodamientos de bolas están estandarizados para permitir la intercambiabilidad. Los rodamientos de bolas también se conocen como rodamientos de elementos rodantes o rodamientos antifricción. Otras características de este tipo de rodamientos es que suele escogerse como primera opción para aplicaciones de alta velocidad o alta precisión, además de que también vienen en gran variedad de formas estandarizadas y pueden manejar tanto cargas axiales como radiales con configuraciones específicas.
- **Rodamientos de rodillos:** Los rodamientos de rodillos son conjuntos mecánicos que constan de elementos rodantes cilíndricos o cónicos que generalmente se capturan entre las pistas internas y externas. Proporcionan un medio para soportar ejes giratorios y minimizar la fricción entre ejes y miembros estacionarios de la máquina. Los rodamientos de rodillos se utilizan principalmente en maquinaria con ejes giratorios que requieren el soporte de cargas más pesadas que las que proporcionan los rodamientos de bolas. Los rodamientos de rodillos cónicos se utilizan a menudo para soportar cargas de empuje más altas además de las cargas radiales. Los tipos van desde cilindros hasta rodillos esféricos. Los rodamientos de rodillos están estandarizados como los rodamientos de bolas, aunque en menor grado. Estos rodamientos por lo general tienen capacidades de carga mucho mayores que los rodamientos de bola y soportan grandes cargas sobre todo del tipo axial.
- **Rodamientos montados:** Los cojinetes montados son conjuntos mecánicos que constan de cojinetes alojados dentro de componentes de montaje atornillados o roscados e incluyen bloques de soporte, unidades con bridas, etc. Proporcionan medios para soportar ejes giratorios y minimizar la fricción entre ejes y miembros estacionarios de la máquina. Los cojinetes montados se utilizan principalmente en maquinaria con ejes giratorios expuestos. Se utilizan como dispositivos de recogida en los extremos de los transportadores y como unidades con bridas a lo largo de puntos intermedios. Los rodamientos pueden ser elementos rodantes o configuraciones de cojinetes lisos. Los cojinetes montados están diseñados para un montaje atornillado y fácil de reemplazar. Otras variedades de cojinetes

montados incluyen cojinetes de extremo de varilla y seguidores de leva. Por lo general estos rodamientos vienen en unidades alojadas, lo que reduce los problemas de montaje y protección, además de que los rodamientos que vienen en estilo cartucho facilitan bastante el reemplazo. Los ejes de estos cojinetes se mantienen en su lugar con tornillos de fijación. Se emplean por lo general en aplicaciones de baja o media velocidad.

- **Rodamientos Lineales:** Los rodamientos lineales son conjuntos mecánicos que consisten en elementos de bolas o rodillos capturados en carcasas y que se utilizan para proporcionar un movimiento lineal a lo largo de los ejes. Los cojinetes lineales se utilizan principalmente en maquinaria que requiere movimiento lineal y posicionamiento a lo largo de ejes. También pueden tener características de rotación secundarias según el diseño. Estos rodamientos proveen menor fricción y mayores exactitudes cuando se les compara con los bujes, pero suelen ser más costosos y más complejos que los bujes.
- **Rodamientos deslizantes:** Los cojinetes deslizantes son conjuntos mecánicos diseñados para proporcionar movimiento libre en una dimensión entre los elementos estructurales. Los cojinetes deslizantes se utilizan principalmente en el soporte estructural de puentes y edificios comerciales e industriales. Estas piezas se adaptan al movimiento térmico, permiten la rotación de la viga final y aíslan los componentes de la estructura contra vibraciones, ruidos y golpes. Otros tipos de cojinetes deslizantes incluyen los que se utilizan en placas base de celosía, intercambiadores de calor y equipos de proceso.
- **Rodamientos a prueba de fricción:** Los cojinetes sin fricción son alternativas mecánicas o electromecánicas a los cojinetes convencionales que proporcionan un soporte de eje controlable a través del aire, campos magnéticos, etc. para aplicaciones críticas de alta precisión.

2.5.2.7 Aislamientos térmicos

Finalmente, uno de los aspectos más importantes que se deben considerar a la hora de reemplazar un motor, especialmente en este caso, que se está tratando de cambiar un motor de CC por uno de CA, es el aislamiento térmico que cada motor tiene. El aislamiento del devanado del motor eléctrico tiene un gran impacto en su esperanza de vida y confiabilidad, lo que significa que usar la clase de aislamiento incorrecta podría ser muy costoso. La mejor manera de evitar este error es familiarizarse con los conceptos básicos de las clases de aislamiento NEMA (Mazziotta, 2020).

El propósito de las clases de aislamiento de motores NEMA es describir la capacidad del aislamiento del devanado del motor para manejar el calor. Actualmente se utilizan cuatro clases de aislamiento de motores eléctricos: A, B, F y H (aunque también hay clases N, R y S). De estos cuatro, B, F y H son los más utilizados. Estas clases especifican el aumento de temperatura permitido desde una temperatura ambiente de 40 ° C (Mazziotta, 2020).

En la tabla 2.6 se muestran las principales características de los 4 aislamientos más comunes que se utilizan en los motores eléctricos.

Se debe aclarar que la temperatura máxima del devanado es la suma de la temperatura ambiente ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$) y el aumento de temperatura permitido. El aumento de temperatura permisible se compone de dos partes: el aumento de temperatura máximo para la clase de aislamiento más un margen de temperatura de punto caliente (Mazziotta, 2020).

Cuando un motor eléctrico funciona a una temperatura superior a la temperatura permitida de bobinado, la vida útil siempre se reducirá. De hecho, un aumento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima del máximo permitido puede reducir a la mitad la vida útil del aislamiento del motor. Si tiene un motor con aislamiento de Clase A, la temperatura máxima del devanado será de $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si está operando a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, eso es $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima de sus límites y cada incremento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima de ese límite reduce la vida útil a la mitad. Esta temperatura de funcionamiento reducirá la vida útil del motor a solo $1/4$ de su esperanza de vida original (Mazziotta, 2020).

Tabla 2.6: Características de los principales tipos de aislamientos térmicos utilizados en motores eléctricos (Mazziotta, 2020).

| Tipo de Aislamiento | Características |
|---------------------|--|
| A | Aumento máximo de temperatura: $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ Permiso de temperatura excesiva en puntos calientes: $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ Temperatura máxima de bobinado: $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| B | Aumento máximo de temperatura: $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ Permiso de temperatura excesiva en puntos calientes: $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ Temperatura máxima de bobinado: $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| F | Aumento máximo de temperatura: $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ Permiso de temperatura excesiva en puntos calientes: $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ Temperatura máxima de bobinado: $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| H | Aumento máximo de temperatura: $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ Permiso de temperatura excesiva en puntos calientes: $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ Temperatura máxima de bobinado: $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ |

La clase de aislamiento adecuada para un motor se basa en dos cosas: la temperatura del aire ambiente y el aumento de temperatura en el motor. Estos forman los puntos de partida para seleccionar la clase de aislamiento adecuada. Normalmente, la temperatura ambiente para las clases de aislamiento discutidas es de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero si la temperatura ambiente va a ser más alta que eso, normalmente se reduce la potencia nominal del motor o se debe utilizar un material de aislamiento de clase de nivel superior (Mazziotta, 2020).

Cuando llegue el momento de comprar un motor de reemplazo, se debe tener cuidado de no elegir un motor con una clase de aislamiento incorrecta o podría correr el riesgo de fallas

prematuras. Para estar seguro, se debe especificar un motor con una clase de aislamiento igual o superior (Mazziotta, 2020).

2.5.2.8 Espacios en los gabinetes

Si es probable que las condiciones ambientales excedan los rangos de trabajo aceptables, entonces se deben hacer arreglos para proporcionar enfriamiento adicional y/o protección ambiental para el convertidor de CA. Los límites de temperatura de un convertidor de CA son mucho más críticos que los de un motor eléctrico. La reducción de temperatura debe aplicarse estrictamente. Sin embargo, es poco probable que un convertidor PWM moderno se destruya si se exceden los límites de temperatura. Los convertidores de CA modernos tienen protección térmica incorporada, generalmente dispositivos de unión de silicio, montados en el disipador de calor. El principal problema del disparo por sobre temperatura está asociado con un disparo molesto y el tiempo de inactividad asociado (Barnes, 2003).

Aunque la eficiencia de los convertidores de CA modernos es alta, típicamente $\pm 97\%$, todos generan una pequeña cantidad de calor, principalmente debido a las pérdidas de conmutación en los circuitos electrónicos de potencia. El nivel de pérdidas depende del diseño del convertidor, la frecuencia de conmutación PWM y la potencia nominal general. Los fabricantes proporcionan cifras de pérdidas (watts) cuando el convertidor está funcionando a plena carga. Se deben tomar las precauciones necesarias para disipar este calor en el ambiente externo y evitar que la temperatura dentro de la caja del convertidor aumente a niveles inaceptablemente altos (Barnes, 2003).

Los convertidores generalmente se enfrían por aire, ya sea por convección (clasificaciones de potencia pequeñas) o asistidos por ventiladores de refrigeración en clasificaciones de potencia más grandes. Cualquier obstrucción al volumen del flujo de aire de refrigeración a la entrada y a las rejillas de ventilación reducirá la eficiencia de la refrigeración. Los flujos de aire de refrigeración y la disipación de la pérdida de potencia determinan los requisitos de aire acondicionado para la sala de equipos (Barnes, 2003).

La refrigeración también depende de que exista una diferencia de temperatura entre el disipador de calor y el aire de refrigeración. Cuanto más alta sea la temperatura ambiente, menos efectivo será el enfriamiento. Tanto el convertidor de CA como el motor están clasificados para funcionar en un entorno en el que la temperatura no supere los 40°C (Barnes, 2003).

Cuando los convertidores de CA se montan dentro de gabinetes, se debe tener cuidado para garantizar que la temperatura del aire dentro del gabinete permanezca dentro de los límites de temperatura especificados. De lo contrario, los convertidores deben reducirse de acuerdo con las tablas de reducción del fabricante (Barnes, 2003).

En un entorno en el que es probable que se produzca condensación durante los períodos en los que el variador no está en uso, se pueden instalar calentadores anti condensación dentro del gabinete. El circuito de control debe estar diseñado para encender el calentador cuando el variador está desenergizado. El calentador mantiene un ambiente cálido y seco dentro del gabinete y evita que la humedad ingrese al gabinete cuando el convertidor se apaga y se enfría (Barnes, 2003).

Los convertidores de CA generalmente están diseñados para montarse en posición vertical, para ayudar al enfriamiento por convección. En los VFD más grandes, el enfriamiento es asistido por uno o más ventiladores montados en la parte inferior o superior del disipador de calor (Barnes, 2003).

Muchos convertidores modernos permiten dos configuraciones de montaje alternativas:

1. Montaje en superficie, donde el plano posterior del convertidor se monta sobre una superficie vertical, como la parte posterior de un gabinete.
2. Montaje empotrado, donde los disipadores de calor en la parte posterior del convertidor se proyectan a través de la parte posterior del gabinete hacia un conducto de enfriamiento. Esto permite que el calor se disipe más eficazmente de los disipadores de calor.

Es necesaria una separación suficiente de otros equipos para permitir el flujo sin restricciones de aire de refrigeración a través de los disipadores de calor y las tarjetas de control electrónico. Una regla general es que debe dejarse un espacio libre de 100 mm alrededor de todos los lados del VFD. Cuando hay más de un VFD en el mismo gabinete, preferiblemente deben montarse uno al lado del otro en lugar de uno encima del otro. También se debe tener cuidado para evitar ubicar equipos sensibles a la temperatura, como sobrecargas térmicas, inmediatamente por encima de la ruta del aire de enfriamiento del VFD (Barnes, 2003).

Se deben tomar las medidas necesarias para disipar las pérdidas del convertidor en el entorno externo. El aumento de temperatura dentro del gabinete debe mantenerse por debajo de la temperatura nominal máxima del convertidor (Barnes, 2003).

El gabinete debe ser lo suficientemente grande para disipar el calor generado por el convertidor y cualquier otro equipo eléctrico montado dentro del gabinete. El calor generado dentro de un recinto se transfiere al entorno externo principalmente por radiación de la superficie del recinto. En consecuencia, el área de la superficie debe ser lo suficientemente grande para disipar el calor generado internamente sin permitir que la temperatura interna exceda los límites nominales (Barnes, 2003).

2.6 Motores para uso con variador electrónico

Los variadores de velocidad electrónicos, conocidos como variadores de frecuencia (VFD), solían comercializarse como "utilizables con cualquier motor estándar". Sin embargo, comenzaron a ocurrir fallas prematuras de los sistemas de aislamiento de motores a medida que se introdujeron los VFD de conmutación rápida y modulación de ancho de pulso (PWM). Las velocidades de conmutación de los semiconductores de potencia modernos pueden provocar sobretensiones. Estos picos de voltaje pueden dañar rápidamente el sistema de aislamiento de un motor y provocar una falla prematura del motor (Dpto. de Energía de EUA, 2012). Un diagrama de este suceso se muestra en la figura 2.27.

La salida de frecuencia variable no sinusoidal de los variadores PWM tiene varios efectos, incluido el aumento de las pérdidas del motor, la ventilación inadecuada a velocidades más bajas, el aumento de las tensiones dieléctricas en los devanados del motor, el ruido magnético y las corrientes del eje. Estos efectos pueden combinarse para dañar el aislamiento de un motor y acortar severamente su vida útil operativa (Dpto. de Energía de EUA, 2012).

Las altas tasas de conmutación de los semiconductores de potencia modernos conducen a cambios rápidos en el voltaje en períodos de tiempo relativamente cortos (dV/dt , cuantificado en unidades de voltios por microsegundo). Las ondas de frente pronunciado con grandes dV/dt o tiempos de aumento muy rápidos provocan sobre impulsos de voltaje y otros problemas de suministro de energía. Cuando la impedancia del motor es mayor que la impedancia del cable conductor entre el motor y el variador, la forma de onda de voltaje se reflejará en los terminales del motor, lo cual generaría una onda estacionaria (Dpto. de Energía de EUA, 2012).

Los cables de motor más largos favorecen las ondas estacionarias de mayor amplitud. Se han producido picos de tensión con valores máximos de hasta 2150 V en un sistema de 480 V que funciona con una sobretensión del 10%. Estos picos altos pueden provocar la ruptura del aislamiento, lo que resulta en cortocircuitos entre fases o entre espiras y, posteriormente, disparos del sensor de accionamiento por sobre corriente (Dpto. de Energía de EUA, 2012).

Se pueden tomar medidas preventivas para evitar fallas del motor causadas por picos de voltaje. Estos incluyen el uso de equipos de acondicionamiento de energía (como filtros dV/dt o reactores de carga) y restringir la distancia o la longitud del cable entre el variador y el motor. Algunos instaladores de variadores también especifican motores de gran tamaño o el uso de aislamiento Clase H de resistencia a altas temperaturas (Dpto. de Energía de EUA, 2012).

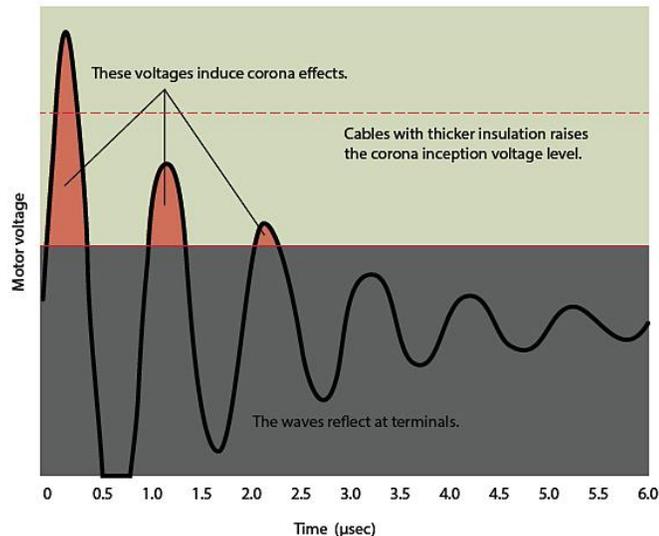


Figura 2.27: Pulso PWM con onda de tensión reflejada (Collins, 2016)

La mayoría de los fabricantes de motores ofrecen motores trifásicos de uso general de eficiencia premium que cuentan con sistemas de aislamiento "aptos para inversores". Por el contrario, los motores para uso con variador electrónico están bobinados con sistemas de aislamiento resistentes a picos de tensión. Algunos usan alambre magnético de grado inversor para minimizar los efectos adversos de las formas de onda producidas por VFD. Otros diseños se enrollan con bobinas adyacentes que están separadas para minimizar el potencial de voltaje.

Los sistemas de aislamiento mejorados reducen la degradación de los motores que están sujetos a picos de voltaje transitorios. Un mayor espesor o acumulación de barniz de primera calidad (a través de múltiples inmersiones y horneados) minimiza el potencial de huecos internos, y un motor con un diseño de menor aumento de calor tiene una mayor resistencia a las tensiones de voltaje (Dpto. de Energía de EUA, 2012).

La calidad de fabricación también afecta el voltaje de inicio de corona (CIV), el punto en el que se producen descargas eléctricas parciales debido a la ionización del aire alrededor del conductor. CIV es una medida de la capacidad de los devanados de un motor para soportar tensiones de tensión. Estos motores se pueden utilizar sin filtros adicionales o reactores de carga siempre que los sobrepasos de voltaje no excedan el límite superior en los terminales del motor (Dpto. de Energía de EUA, 2012).

Los motores para uso con variador electrónico de tensión media con una tensión base que exceda los 600 V deben poder soportar un voltaje pico igual a 2.04 veces el voltaje nominal de línea a línea del motor. Los tiempos de subida deben ser iguales o superiores a 1

microsegundo. Estos motores también están diseñados para rangos de velocidad de par constante más amplios que los que se pueden proporcionar con un motor de uso general.

Mientras que un motor de 10 hp de eficiencia superior, totalmente cerrado y enfriado por ventilador puede ser capaz de un rango de velocidad de par constante de 10: 1, un motor de este tipo es capaz de proporcionar un par nominal completo a velocidad cero, así como funcionar bien sobre su velocidad base. El uso de motores para uso con variador electrónico para cargas de par variable es excesivo, ya que los motores de uso general son adecuados para el control de VFD con cargas de par variable (Dpto. de Energía de EUA, 2012).

El sistema de aislamiento de un motor de 208/230 V es idéntico al de un motor de 460 V. Por lo tanto, es poco probable que los picos de voltaje producidos por los inversores en sistemas de 208 o 230 V causen daños en el aislamiento en cualquier longitud de cable o frecuencia de la portadora del variador. Los motores para uso con variador electrónico más grandes a menudo tienen un ventilador auxiliar de velocidad constante para proporcionar una refrigeración adecuada para los motores en funcionamiento. a bajas velocidades. Para tamaños de la carcasa demasiado grandes, estos motores deben tener ambos cojinetes aislados y estar equipados con un cepillo de puesta a tierra del eje con una correa de puesta a tierra desde el motor hasta la caja de transmisión (Dpto. de Energía de EUA, 2012).

Los motores para uso con variador electrónico se especifican cuando operan a velocidades extremadamente bajas, particularmente cuando se trabaja con una carga de par constante, o cuando se opera por encima de la velocidad base. Cuando se requiera un motor de este tipo, se debe asegurar que esté diseñado y fabricado para cumplir con las especificaciones más actuales definidas por NEMA MG 1 Sección IV, "Normas de rendimiento que se aplican a todas las máquinas", Parte 31, "Motores polifásicos alimentados por inversor de propósito definido" (Dpto. de Energía de EUA, 2012).

CAPÍTULO 3: Propuesta metodológica

Ahora que se ha establecido el sustento teórico sobre el cual se fundamenta este proyecto, se procede entonces con la propuesta metodológica y los resultados que se obtuvieron con las simulaciones. En este capítulo, primero se muestra la metodología que se sugiere seguir para reemplazar un motor de CC por uno de CA con un variador de velocidad en el caso del manejo de una extrusora de plástico. Seguidamente se despliegan los resultados que se obtuvieron durante las simulaciones y se analizan brevemente para verificar su validez.

El problema que se estudia en este proyecto se puede plantear mediante la siguiente pregunta:

“Si se tiene un sistema de motor y controlador CC que se encarga de accionar una extrusora de plástico y debe reemplazarlo con un motor CA que funcione con un variador de frecuencia, ¿Qué criterios podrían utilizarse para cambiarlo?”

Es decir, el sistema de CC es el sistema original, y lo que se busca es pasar ahora a un nuevo sistema en CA que pueda ser equivalente al sistema CC, siguiendo algunos criterios que ayuden al personal de la empresa a cambiar el equipo.

En el capítulo 2, se mencionaron varios aspectos eléctricos y mecánicos que se deben considerar para cambiar un sistema de CC por uno de CA. En particular se mencionó el hecho de que, para pasar de un sistema CC a uno CA, se debe considerar la característica par-velocidad de la carga y si el torque de arranque del sistema CC original es menor que el 150% del par nominal de la máquina, se puede utilizar un sistema de motor de inducción con variador de velocidad de la misma potencia nominal.

Con esto en mente, entonces se puede seguir la siguiente metodología para el reemplazo:

- ***Paso 1: Estudio del sistema actual.*** Este paso consiste en el estudio de la extrusora de plástico, y del motor CC que actualmente controla a la extrusora. De la extrusora se debe conocer su característica par-velocidad, es decir, el par que esta representa y la velocidad a la cual operaría. Del motor CC, se deben conocer sus datos eléctricos, mecánicos y térmicos, con el fin de caracterizar de la manera más completa al sistema actual. Todo esto se debe realizar durante una visita de campo, en la cual también se deben evaluar el estado actual de la instalación eléctrica y mecánica, con el fin de también recomendar modificaciones adicionales que se consideren necesarias luego de seleccionar el motor y el variador que servirán de reemplazo, y se deben tomar fotografías a las placas a los equipos CC actuales en caso de que se requiera más información sobre estos en el futuro. El personal técnico que lleve a cabo la migración debe tener un listado de estos aspectos al inicio y al final de la migración. Esto se muestra de forma gráfica en la figura 3.1.

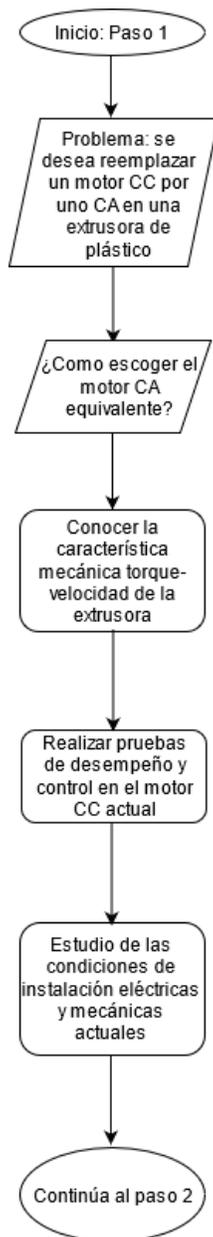


Figura 3.1: Diagrama de flujo del primer paso de la metodología.

- **Paso 2: Primera aproximación en CA.** El siguiente paso corresponde a la primera aproximación que se debe realizar al reemplazar el sistema CC actual por el nuevo sistema CA. En este caso, se escoge un motor CA de la misma capacidad nominal que el motor CC actual. De este motor CA, es necesario conocer las características eléctricas, mecánicas y térmicas, y compararlas con las del motor CC actual. Si la diferencia entre la característica par-velocidad obtenida para el motor CA no difiere

significativamente de la del motor CC actual, y la característica térmica es igual o mejor, se puede decir que este motor sería el candidato adecuado para reemplazar al motor CC. Asimismo, si es posible realizar alguna simulación en la que se muestre el comportamiento del motor CA al manejar la extrusora, se debe llevar a cabo para observar cuál será el comportamiento del nuevo motor CA manejando la carga mecánica. Esto se muestra sintetizado en la figura 3.2.

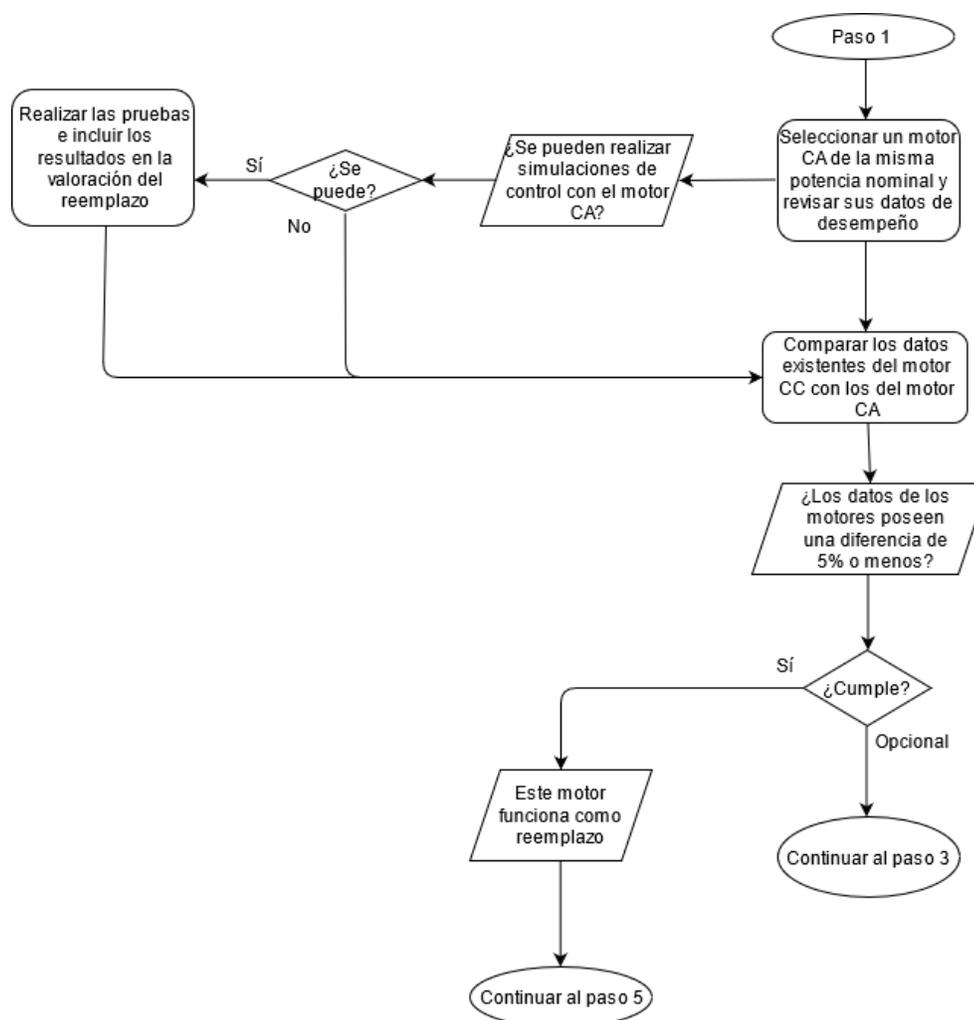


Figura 3.2: Diagrama de flujo del segundo paso de la metodología.

- **Paso 3: Segunda aproximación en CA.** Si bien el motor CA de la misma capacidad que el motor CC actual podría ser el mejor candidato para reemplazarlo, se puede realizar un paso opcional y probar con un motor CA de la capacidad nominal inmediatamente inferior a la capacidad nominal del motor CC. Esto podría variar según la disponibilidad de los fabricantes, por lo que se deben revisar las opciones

disponibles y escoger la que sea inmediatamente inferior. Al igual que el motor anterior, se deben conocer las características eléctricas, mecánicas y térmicas del motor CA para poder compararlas con las del motor CC actual y las del motor CA del caso anterior aplicando el mismo criterio de evaluación. Asimismo, si es posible realizar simulaciones que demuestren el comportamiento del motor al controlar la extrusora, estas deben realizarse con el fin de verificar la viabilidad del reemplazo en este caso. Esto se muestra resumido en la figura 3.3.

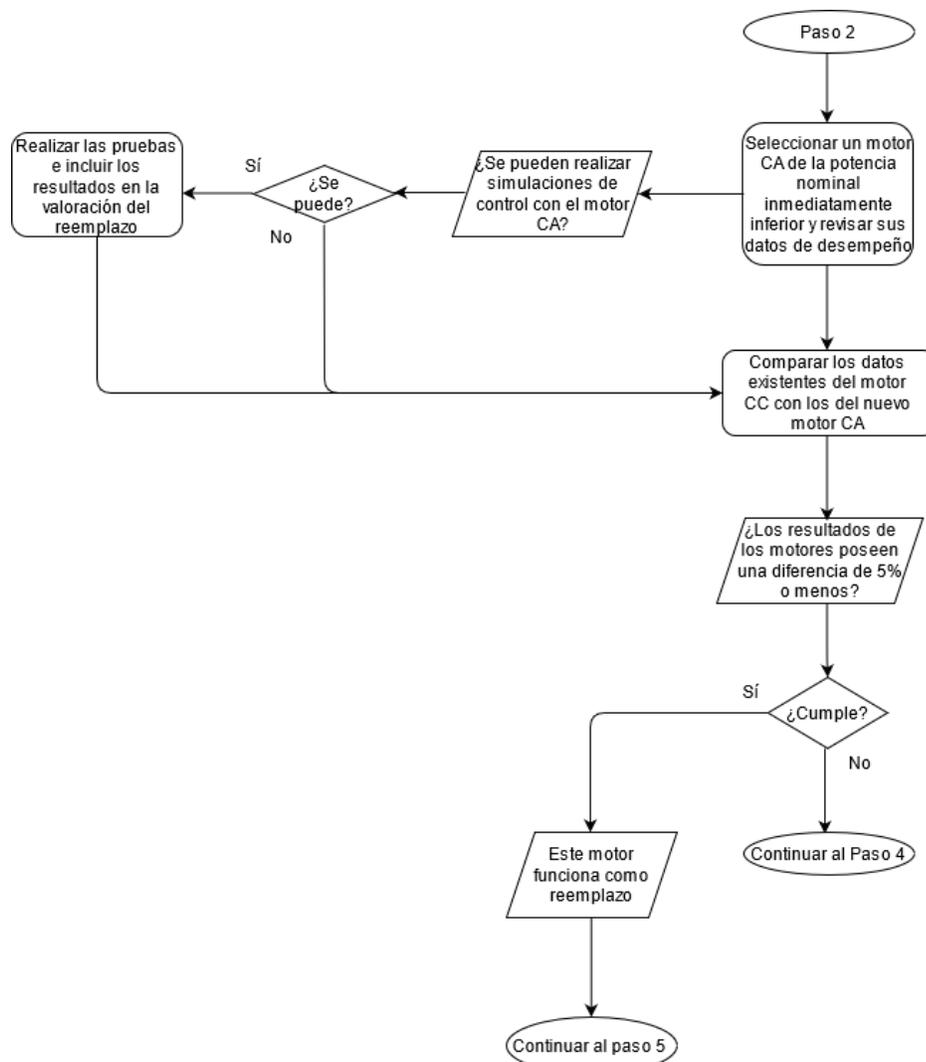


Figura 3.3: Diagrama de flujo del tercer paso de la metodología.

- **Paso 4: Tercera aproximación en CA.** Si ya se han evaluado los dos motores anteriores y se observa que no son candidatos adecuados, debido a que no cumple el criterio de selección del 5%, entonces se debe probar con un motor CA de capacidad

superior a la capacidad nominal del motor CC actual. Se empieza por el motor CA de capacidad inmediatamente superior, según sea la disponibilidad de los fabricantes, y se recopilan los mismos datos. Estos datos se comparan con los del motor CC actual para ver si se cumple el criterio del 5% o menos. Si esto no es posible con el primer motor, se pasa al motor con la capacidad nominal superior siguiente y así sucesivamente, hasta que se obtenga un candidato adecuado para el reemplazo. Esto se muestra sintetizado en el diagrama de flujo de la figura 3.4.

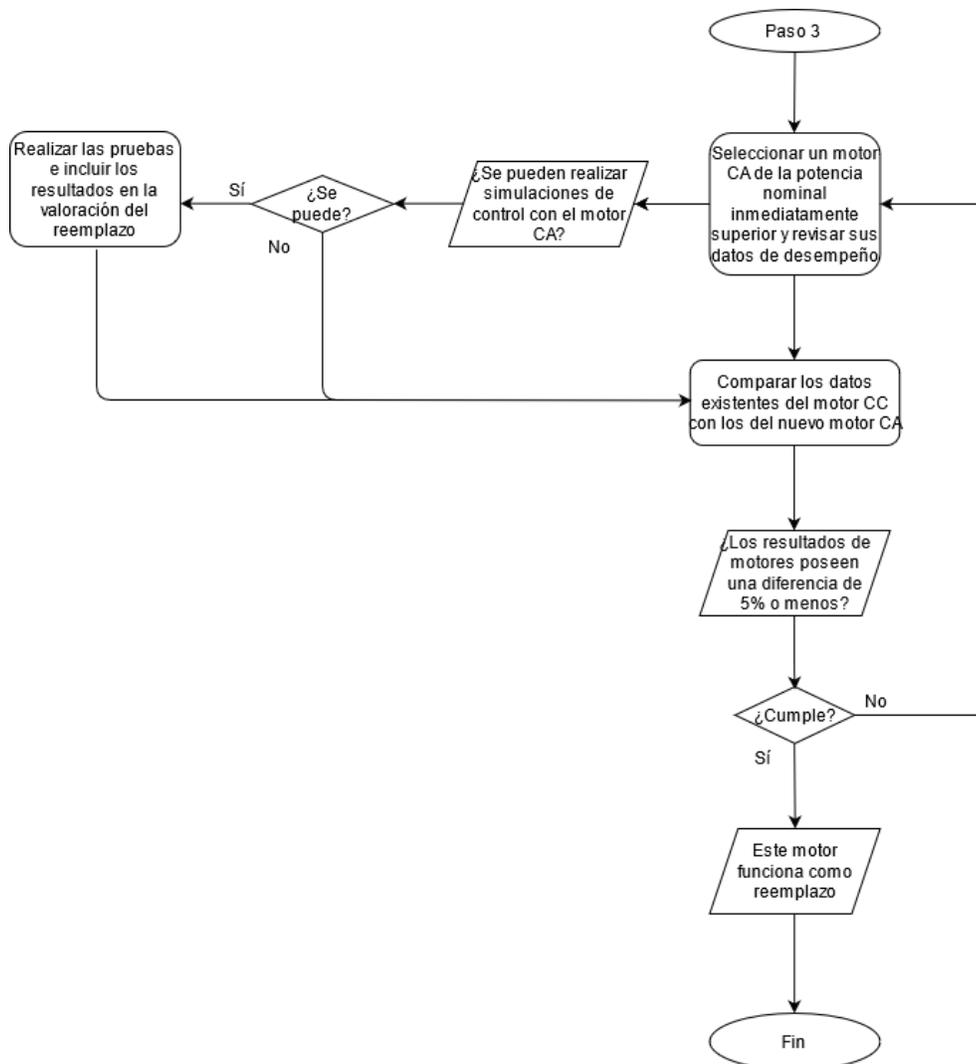


Figura 3.4: Diagrama de flujo del cuarto paso de la metodología propuesta.

- ***Paso 5: Dimensionamiento del variador, aspectos eléctricos y mecánicos y puesta en marcha del nuevo sistema CA.*** En este paso, una vez que se ha seleccionado el motor CA que ha de reemplazar al motor CC, se debe escoger el VFD que lo acompañará. Para efectos prácticos, se debe escoger un VFD de la misma potencia y tensión nominales que el motor CA escogido, y se debe especificar al mismo como “Heavy Duty”, debido al tipo de aplicación que es la extrusora de plástico que requiere una sobrecarga mayor. Una vez que se hizo esto, se deben también indicar los aspectos eléctricos y mecánicos que se necesitan cambiar para reemplazar el sistema CC actual por el nuevo sistema CA. Y finalmente se debe poner en marcha el nuevo sistema, considerando que el nuevo VFD debe ser integrado con el sistema de automatización presente en el área de producción. Esto último se puede encomendar a una empresa integradora de sistemas que también se encargue de realizar las pruebas de auto ajuste, especialmente si se llega a utilizar un variador vectorial. Esto se muestra resumido en la figura 3.5.

Para efectos del caso de estudio que se considera en este trabajo, dado que es un proyecto de simulación, se realizan solo los primeros 4 pasos, sin considerar los aspectos eléctricos y mecánicos iniciales. Sin embargo, dado que el objetivo del trabajo es el planteo de una metodología que se pueda aplicar a escenarios reales, los aspectos eléctricos y mecánicos se deben analizar en el primer paso, mediante la visita de campo, y se debe llevar a cabo el paso 5 anteriormente descrito, con el fin de realizar la migración de manera exitosa y completa.



Figura 3.5: Diagrama de flujo del quinto paso de la metodología propuesta.

CAPÍTULO 4: Desarrollo de la metodología

Para probar la metodología propuesta, se procede entonces a escoger un caso de estudio. En esta ocasión, se escogió una extrusora de plástico que posee un torque nominal de 80 Nm y una velocidad rotacional máxima de 600 rpm. El motor que se encarga de accionar esta extrusora es un motor CC de 10 hp y 1750 rpm y configuración de excitación independiente.

Estos dos están acoplados por una caja de engranes que se encarga de aumentar el par que suministra el motor mientras que disminuye la velocidad. La reducción se realiza en la proporción 4:1, lo que implica que por cada 4 rotaciones del eje del motor se genera una rotación del tornillo de la extrusora, mientras que amplifica el par proporcionado por el motor por un factor de 4. De esta forma, del motor, este opera con bajo par y alta velocidad, mientras que del lado de la extrusora ocurre lo contrario.

4.1 Simulación del sistema extrusor de plástico con motor CC

El motor que se utilizó tiene las características que se muestran en la tabla 4.1. En este caso, el motor se controla mediante un sistema de control en cascada, que retroalimenta la corriente de armadura y la velocidad hacia el controlador, tal como se explicó en el marco teórico. Para este motor, se debe obtener la curva par-velocidad, la eficiencia, el comportamiento térmico y se tienen las pruebas de control. La eficiencia y la curva par-velocidad se obtienen de las pruebas de desempeño hechas con el estándar IEEE 113.

Tabla 4.1: Especificaciones técnicas del motor CC.

| Parámetro | Valor |
|--|----------|
| Potencia nominal (hp) | 10 |
| Velocidad nominal (rpm) | 1750 |
| Tensión nominal de la armadura (V) | 500 |
| Corriente nominal armadura (A) | 17.5 |
| Tensión nominal del campo (V) | 300 |
| Resistencia devanado armadura (Ω) | 4.712 |
| Inductancia devanado armadura (H) | 0.05277 |
| Resistencia devanado campo (Ω) | 180 |
| Inductancia devanado campo (H) | 71.47 |
| Inductancia mutua campo-armadura (H) | 1.345 |
| Inercia total (kg m^2) | 0.04251 |
| Coefficiente de fricción viscosa (Nm s) | 0.003406 |
| Torque de fricción de Coulomb (Nm) | 1.046 |

Se debe añadir la observación de que para este sistema se añade una resistencia en serie con el devanado de armadura, que tiene la función de generar mayor capacidad de torque y corriente en casos en los que se requiere mayor demanda. Además, este devanado tiende a potenciar la distorsión del campo producido por el devanado de armadura. En los controladores CC modernos, estos tienen la opción de ser configurados para generar el efecto de debilitamiento de campo sin la necesidad del devanado externo.

Como se indicó lo primero es obtener la curva par velocidad del sistema. Esto se realiza con la prueba de eficiencia del estándar IEEE 113. Para esta prueba se utiliza el sistema que se muestra en el apéndice AP.9 del trabajo. La prueba de eficiencia y las curvas par velocidad se obtuvieron para ambos escenarios, el motor CC operando con y sin el devanado serie. El valor de torque que se utiliza para este motor y los motores CA es el valor del torque del lado del motor, antes de la caja de engranes, que es 20 Nm.

Las pruebas se llevan a cabo en un lapso de aproximadamente 80 segundos, periodo después del cual se toman los resultados y se trasladan a un archivo de Excel configurado para realizar los cálculos de eficiencia, de acuerdo con lo especificado en el estándar. Al final, con los valores de eficiencia obtenidos, se puede graficar la eficiencia como función del porcentaje de la carga nominal. Esta gráfica se muestra en la figura 4.1.

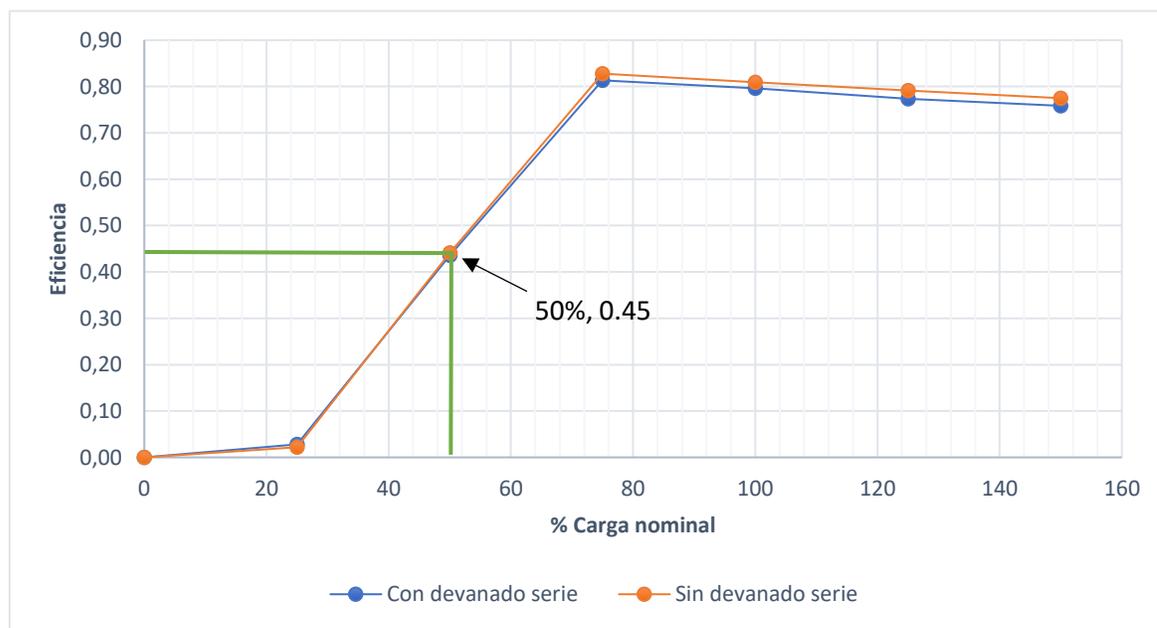


Figura 4.1: Curva de eficiencia para el motor CC operando con y sin el devanado serie en la armadura. Generado con Excel.

En esta figura también se ha marcado la eficiencia con la que operaría el motor al controlar la extrusora. Dado que el par de la extrusora es de 80 Nm y está acoplada a la caja de engranes, el par del lado del motor se reduce por el factor de 4, por lo que este solo necesita entregar 20 Nm. Esto representa alrededor del 50% del par nominal que puede entregar este motor, que son 40.69 Nm, por lo que, al marcar este valor en el eje horizontal de la gráfica, se traslada hacia la curva y de ahí hacia el eje de la eficiencia. Para este caso, se puede observar que, el motor opera con una eficiencia cercana al 45%.

Ya con esto se tiene un primer dato, que es la eficiencia con la cual opera el motor CC. Ahora se debe obtener la característica par velocidad. Para esto, se utilizan las curvas par velocidad del motor, para operación con y sin devanado serie, se marca el par y se traslada al eje horizontal de la velocidad. Esto se muestra en la figura 4.2. Se observa que para cuando el motor opera sin la resistencia serie, la velocidad es cercana a 1790 rpm (447 rpm del lado de la extrusora), mientras que cuando tiene la resistencia serie conectada, la velocidad es alrededor de 1760 rpm (440 rpm del lado de la extrusora). Para efectos de realizar la comparación, se considerará el caso del motor con la resistencia serie conectada, ya que muestra que el motor ocuparía mayor velocidad.

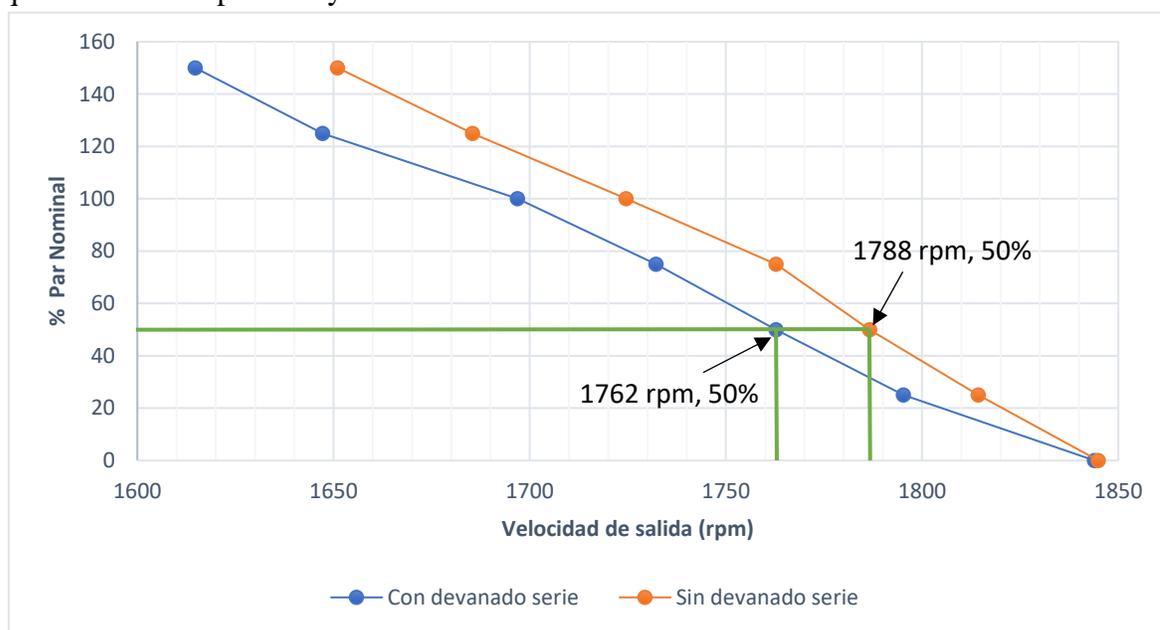


Figura 4.2 Curva par velocidad para el motor CC para operación con y sin resistencia serie. Generada con Excel.

A partir de las pruebas hechas, también es posible obtener una curva que muestre la corriente de armadura como una función de la carga aplicada al motor. Este también podría ser otro factor fundamental a la hora de realizar la decisión, ya que la corriente está principalmente a las pérdidas resistivas de los motores, por lo que menos corriente implica también menos pérdidas. Dicha curva se muestra en la figura 4.3. En esta curva también se ha señalado

la corriente de armadura que consume este motor cuando opera con el par que ocupa para manejar la extrusora. Se puede ver que es aproximadamente 10 A.

Asimismo, el comportamiento del motor CC es conocido, y como parte de la metodología, este también se considera un parámetro de desempeño, se realiza un modelado térmico del motor. Para esta parte, se utilizó un *script* en MATLAB®, que graficara la función de temperatura, ecuación (21), en función del tiempo, que para este caso se utilizó un lapso de 3 horas, equivalente a 10800 segundos. Para completar los datos de peso de cobre y área de ventilación, se utilizaron datos de un motor CC real, obtenidos del catálogo en línea de ABB. Se escogió un motor de la misma potencia nominal, velocidad nominal y tensión de campo y armadura nominales. La ecuación resultante se muestra en (55):

$$T(t) = 25 + 69.6254 \left(1 + e^{-t/1037.5} \right) \quad (55)$$

Al ejecutar el *script*, se obtiene la curva de la figura 4.4. Se observa que, inicialmente, la temperatura del motor es igual a la temperatura del ambiente, y crece hasta llegar a un valor estacionario de aproximadamente 95 °C, que es la etapa de equilibrio térmico.

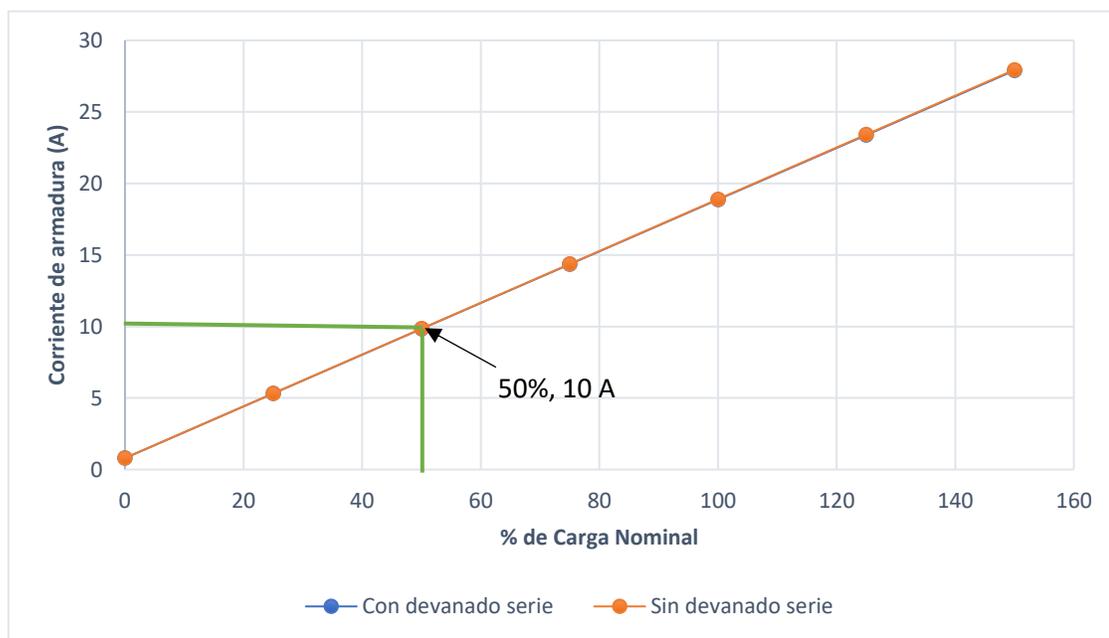


Figura 4.3 Curva de corriente de armadura en función del par aplicado para el motor CC. Generada con Excel.

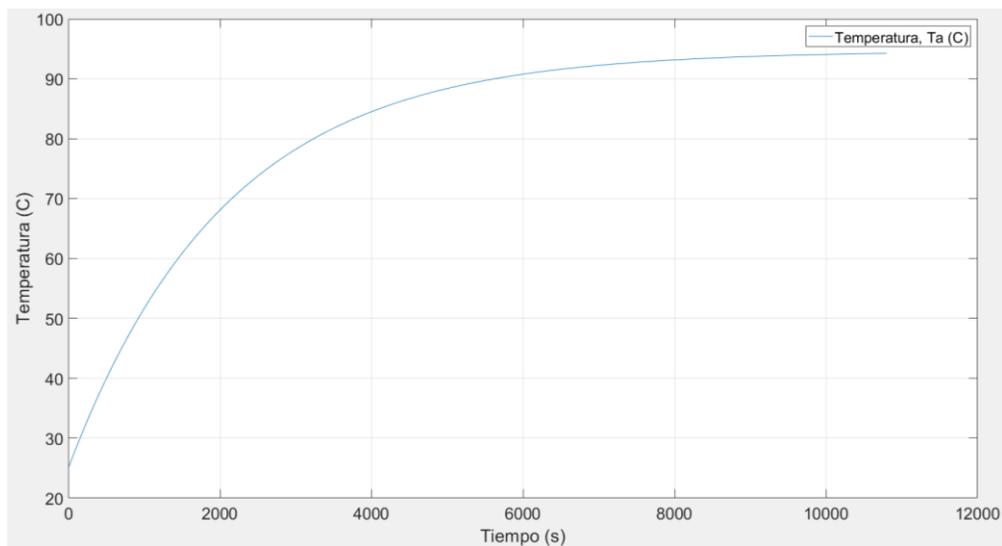


Figura 4.4 Curva de temperatura del motor CC con respecto al tiempo. Generada con MATLAB®.

Ahora se evalúa la característica de control que muestra el sistema en CC actual, de tal forma que se pueda medir la corriente y la tensión de armadura, la velocidad rotacional y el torque que desarrolla el motor en función del tiempo. El sistema que se utiliza para realizar esta simulación se muestra en el apéndice AP.10. En dicho diagrama la caja de engranes se modela únicamente como una ganancia. Este sistema muestra la característica de control que presenta el motor al manejar la carga. Esta simulación se realiza en un lapso de 30 segundos, con una frecuencia de muestreo de 100 kHz y los transistores conmutan a una frecuencia de 10 kHz.

Como se describió anteriormente, el control que utiliza este sistema es un control en cascada, en el cual se retroalimenta la corriente de armadura y la velocidad rotacional y con esto los controladores de velocidad y corriente actúan para llevar al sistema al valor de velocidad deseado y mantener su par cercano al par de carga. Utilizando los parámetros del motor descritos en la tabla 3.1, y tomando $k_t = 0.34$ como la constante de torque del motor, se pueden sintonizar los parámetros del motor, utilizando las ecuaciones (29) y (30) para el caso del lazo eléctrico, y las ecuaciones (38) y (39) para el lazo de velocidad. De esta manera se obtienen los valores de la ganancia proporcional y el tiempo integral para cada uno de los lazos que se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Parámetros de los controladores PI para el sistema de control en CC.

| Parámetro | Lazo de control de corriente de armadura | Lazo de control de velocidad |
|-----------------------------|--|------------------------------|
| Ganancia proporcional K_p | 49.7345 Ω | 11.7837 As/rad |
| Tiempo integral T_i | 4440.9554 s | 175.7444 s |

Con los controladores ya sintonizados, se procede entonces a realizar la simulación. Claramente, a los controladores se les han añadido la característica de “anti wind-up” o limitación de desbordamiento de la componente integral. Para el caso del controlador de corriente, este límite se estableció en ± 500 V, que es la tensión máxima que puede entregar el puente, mientras que para el de velocidad se puso en ± 15 A, que es la corriente nominal de la máquina. Los datos obtenidos con este sistema se exportan a *MATLAB*® para ser graficados. Para todas las variables se tiene un valor medido y un valor de “consigna” o valor “deseado” que sería el valor que la variable debería estar tomando.

Primero se analizan las variables mecánicas. En la figura 4.5 se muestra la curva de velocidad con respecto al tiempo. La velocidad deseada la pone un generador de números aleatorios, cuyos valores oscilan entre cero y la velocidad nominal de la extrusora, y se presenta como una curva de color magenta en la figura. Esta curva, sin embargo, no se aprecia ya que en la misma figura se muestra la velocidad que se mide en la extrusora, que se grafica como una curva de color verde, y está superpuesta a la curva magenta. Con esto se comprueba que el controlador efectivamente está siguiendo los valores deseados de velocidad con un error permanente nulo.

Seguidamente, también se muestra el torque desarrollado por la máquina y el torque de carga que se aplica, en la figura 4.6. Como se mencionó anteriormente, el torque de la carga, que en este caso se toma como la extrusora, se considera como una perturbación para el sistema, por lo que no incluyó durante la sintonización de los controladores. En la figura, se aprecia la curva magenta, que muestra el par de la carga (extrusora), y la curva verde, que muestra el par medido en la caja de engranes.

Claramente se observa una diferencia entre el par de carga y el que desarrolla la máquina. Esto se debe a que, en la ecuación (31), de análisis mecánico, hay un término adicional que no se consideró pero que sí se muestra en la tabla 4.1. Este término es el torque de fricción de Coulomb y es el que provoca este desfase entre las curvas. También se debe a que hay una fricción viscosa que presenta un torque de oposición y es directamente proporcional a la velocidad del motor, por lo que este también interfiere con el torque desarrollado por la máquina.

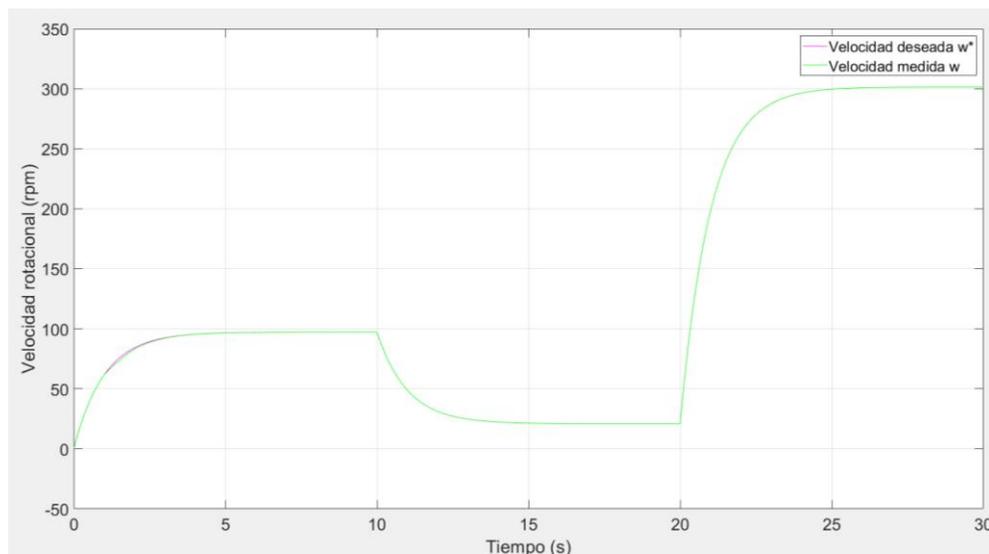


Figura 4.5 Velocidad rotacional del motor CC en función del tiempo. Generada con MATLAB®.

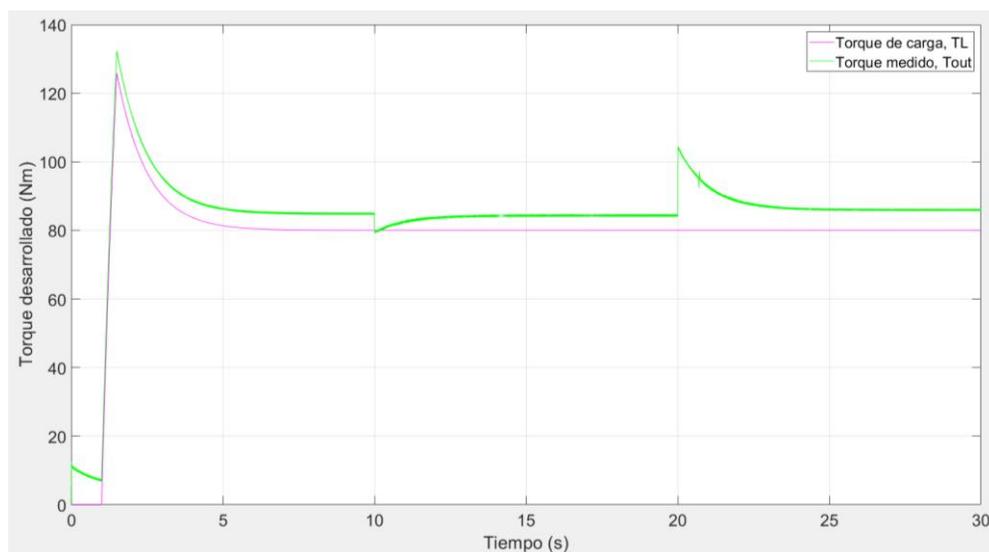


Figura 4.6 Torque desarrollado por la máquina y par de carga en función del tiempo. Generada con MATLAB®.

Otra observación importante en esta gráfica, es que se observan algunos picos o saltos en la figura, específicamente para $t = 10$ segundos y $t = 20$ segundos. Estas discontinuidades en la curva de torque se deben a que es en estos tiempos específicos que el generador de números aleatorios, que se utiliza para poner las consignas de velocidad, cambia de valor y

por ende la máquina debe ajustar su torque para hacer corresponder la velocidad rotacional con la nueva consigna de velocidad impuesta por el bloque.

Ahora que se han analizado las variables mecánicas, se estudian las eléctricas. Empezando por la corriente de armadura, cuya gráfica en función del tiempo se muestra en la figura 4.7. En la figura se observa principalmente la curva azul, que es la corriente de armadura medida en las terminales del motor, y que esta superpuesta a la curva roja, que representa la corriente de armadura deseada, es decir, el valor de la corriente de armadura que indica el controlador de velocidad, ya que la salida de este controlador es el que pone estos valores, de acuerdo con el esquema de control en cascada utilizado.

Puede verse que la respuesta del controlador es bastante apropiada, ya que ambas gráficas prácticamente se superponen, de tal forma que no se tiene error. Otra observación interesante sobre esta gráfica es que su forma es similar a la del torque desarrollado por el motor, lo cual le da validez al hecho de que ambas variables, torque electromagnético y corriente de armadura son directamente proporcionales, y la constante de proporcionalidad es la constante de torque de la máquina.

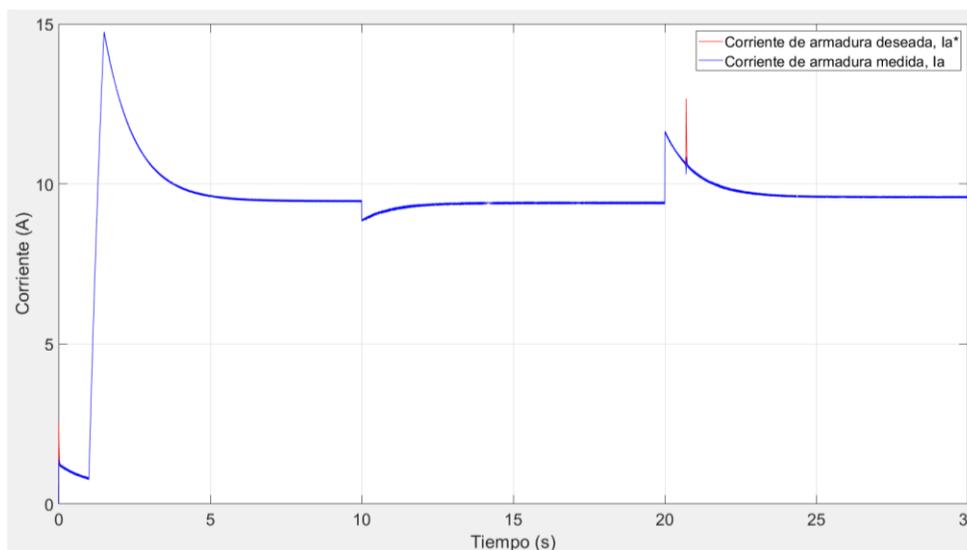


Figura 4.7 Corriente de armadura deseada y su valor medido en función del tiempo. Generada con MATLAB®.

Finalmente, de las variables eléctricas, se analiza la tensión de armadura. Esta se muestra en la figura 4.8. En este caso, la curva roja muestra el valor deseado de la tensión de armadura, es decir, el valor que sale del controlador de corriente de armadura, y es la que llega al bloque del modulador PWM, que es el que controla el encendido y apagado de los transistores en el puente H, que es al final, el que alimenta al motor. La curva azul, muestra la tensión medida en terminales de la máquina.

Puede verse que esta tensión difiere un poco de la tensión deseada proveniente del controlador, pero esto se debe a que el filtro que se pone a la salida del puente H no está filtrando correctamente las componentes de alta frecuencia. Se debe recordar que la tensión que sale del puente H es una tensión PWM, y que los pulsos tienen componentes de alta frecuencia, por lo que estas se deben filtrar para obtener un resultado más apropiado a la hora de medir adecuadamente la tensión que se le suministra a la máquina.

Otro aspecto importante que se debe notar sobre esta gráfica, es que su forma es bastante similar a la curva de velocidad, lo cual también está acorde con la teoría, ya que la tensión de armadura también se compone de la tensión de velocidad, $k\omega$, por lo que, a medida que la velocidad varía, también lo hará la tensión de armadura total.

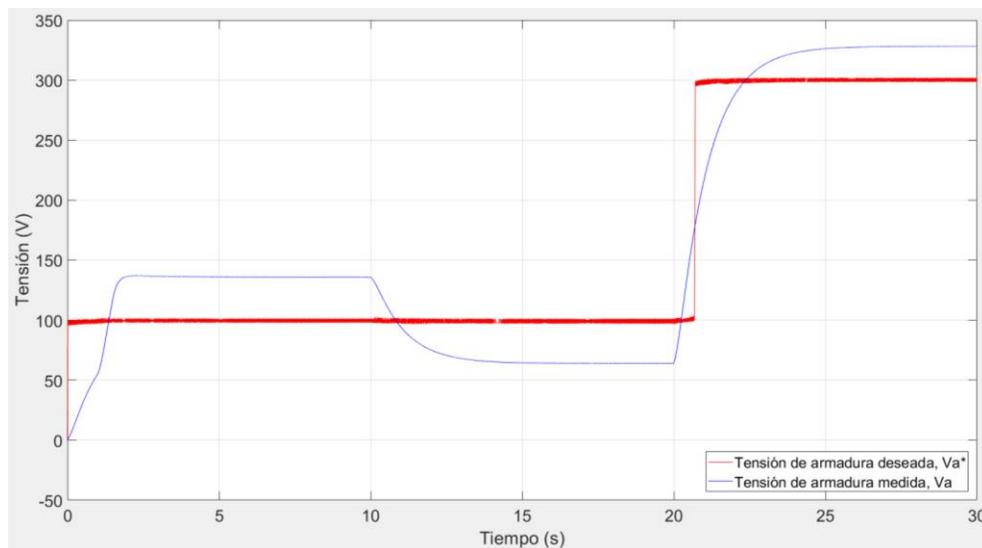


Figura 4.8 Tensión de armadura del motor CC medida con respecto al tiempo. Generada con MATLAB®.

4.2 Simulaciones de los sistemas de CA

Ahora que se han evaluado todos los aspectos del motor CC actual, y se cuenta con la característica par-velocidad de la extrusora, se procede entonces a escoger los motores CA que podrían servir como reemplazo para el motor CC. Siguiendo la metodología que se expuso en el capítulo 3, se debe analizar la curva par-velocidad del motor CA y marcar la característica par-velocidad de la extrusora. Siguiendo la metodología, se debe evaluar primero un motor de la misma potencia nominal, se evalúa un motor de potencia inmediatamente inferior, y uno de potencia inmediatamente superior.

Se empieza con un motor CA de 10 hp y 1760 rpm, que es lo que se tiene en la biblioteca de Simulink®. Haciendo las pruebas de desempeño del motor según el estándar CSA 390-10, se obtiene la curva de eficiencia y la curva par velocidad del motor. Se marca la característica par-velocidad de la extrusora y se compara con la original en CC.

Luego, se prueba con otros 2 motores de 5 hp, 1750 rpm y 20 hp, 1760 rpm. En esta parte, también se mide el comportamiento térmico y las características de control de los 3 motores. Estos valores se escogieron debido a que se están trabajando con los modelos prefijados que vienen en la biblioteca de Simulink®, y estas son las capacidades más cercanas a 10 hp que están disponibles en dicha biblioteca.

Para las pruebas de control, se emplean dos métodos: el control a lazo abierto V/Hz sensorless sin encoder, y el control a lazo cerrado vectorial indirecto con encoder. En el primer caso no se da ninguna retroalimentación de variables, mientras que, en el segundo, se retroalimentan las corrientes de estator y la velocidad rotacional del sistema.

4.2.1 Motor CA de 10 hp

El primer motor de CA a analizar, es el motor de 10 hp. En la tabla 4.3, se muestran los parámetros de esta máquina.

Tabla 4.3 Parámetros del motor CA de 10 hp

| Parámetro | Valor |
|---|----------|
| Potencia nominal (hp) | 10 |
| Velocidad nominal (rpm) | 1760 |
| Corriente nominal (A) | 12 |
| Tensión nominal (V) | 460 |
| Frecuencia nominal (Hz) | 60 |
| Eficiencia nominal (%) | 91 |
| Factor de potencia nominal (%) | 83 |
| Resistencia del estator (Ω) | 0.6837 |
| Inductancia de dispersión del estator (H) | 0.004152 |
| Resistencia del rotor (Ω) | 0.451 |
| Inductancia de dispersión del rotor (H) | 0.004152 |
| Inductancia mutua (H) | 0.1486 |
| Inercia rotacional (kg m^2) | 0.05 |
| Coefficiente de fricción viscosa (Nm s) | 0.008141 |
| Pares de polos | 2 |

La metodología que se sigue en este trabajo implica que se debe marcar la característica par-velocidad de la extrusora en la curva par-velocidad del motor CA para ver si esta sería la opción de reemplazo más adecuada. Como se mencionó anteriormente, a 20 Nm de carga, que es la carga que representa la extrusora medida desde el lado del motor CC, la velocidad rotacional es de aproximadamente 1790 rpm. Este procedimiento se realizaría con los otros dos motores CA, y el motor que tenga la característica más cercana sería entonces la opción más adecuada.

Para obtener la curva par-velocidad del motor CA, se realizan las pruebas de eficiencia del estándar CSA 390-10 descritas en el marco teórico. De esta forma se podría saber también la eficiencia con la cual operaría el motor CA al controlar la extrusora. En el apéndice AP.11 se muestra el esquemático de la simulación utilizada para obtener la eficiencia y la curva par-velocidad de los 3 motores de CA.

En este caso, se utiliza una fuente de CA trifásica balanceada conectada en estrella con neutro aterrizado para alimentar al motor, cuyo valor de tensión se puede ajustar, para el caso de la prueba sin carga. Asimismo, se utiliza un bloque de constante para la carga del motor, para realizar las pruebas de carga a los motores. Para medir las variables eléctricas, se utilizan PMU's que muestran la amplitud de la tensión y la corriente en cada una de las fases. También se utiliza un medidor de potencia para la potencia activa, y se miden también las variables mecánicas (torque y velocidad).

Al realizar las pruebas de eficiencia para este motor, se obtiene la curva de eficiencia en función del porcentaje de par nominal de la máquina, la cual se muestra en la figura. Asimismo, también se ha marcado la eficiencia con la que operaría el motor al manejar la extrusora. Esto se muestra en la figura 4.9. Para este caso, se observa que el motor operaría con una eficiencia cercana al 92%, lo cual es aproximadamente al doble de la eficiencia con la que lo hace el motor CC, lo cual implica un mejor manejo de la potencia de entrada.

Asimismo, también se muestra la curva par-velocidad de un motor de ABB con la misma potencia, velocidad nominal y tensión que el modelo de MATLAB®. Se observa que la curva de este motor es muy similar a la del modelo de MATLAB®, lo que indica que los valores obtenidos se pueden considerar como fidedignos de un modelo realista, y las pruebas se realizaron adecuadamente.

Asimismo, con las pruebas realizadas se pudo medir el factor de potencia que presenta la máquina durante estas pruebas, y los resultados también se comparan con los provistos por ABB para el mismo motor. Esto se muestran en la figura 4.10. Se observa que los valores obtenidos para el modelo de MATLAB® son muy similares a los que presenta el motor de ABB, lo que da más confiabilidad a los resultados.

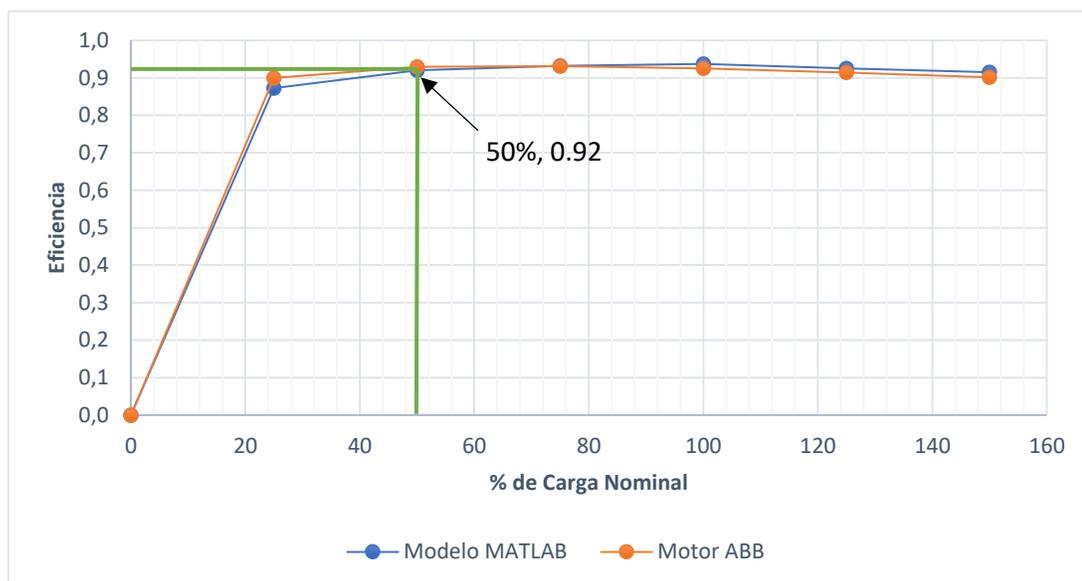


Figura 4.9 Curva de eficiencia con respecto a la carga nominal para motor CA de 10 hp. Generada con Excel.

Para esta gráfica, también se marcó la característica de par de la extrusora, y se observa que el motor opera con un factor de potencia de aproximadamente 0.75. Una observación importante es que el factor de potencia que se marca aquí corresponde al que tendría el motor si no estuviera conectado con el variador. Esto se realiza con el fin de observar las diferencias en este parámetro para cada uno de los motores CA evaluados.

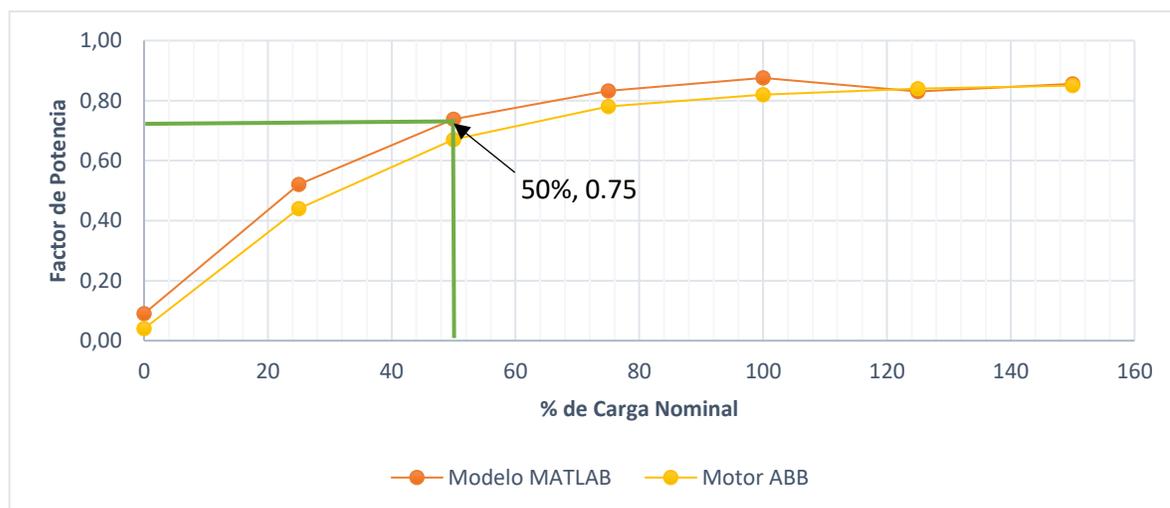


Figura 4.10 Curva de factor de potencia en función de la carga nominal, motor CA 10 hp. Generada con Excel.

En un escenario real, y puesto que, el objetivo del trabajo es el de reemplazar el motor CC por uno CA que opere con un variador de velocidad, este dato pierde algo de relevancia, puesto que los variadores de velocidad comerciales normalmente se diseñan para mostrar un factor de potencia cercano a 0.98 en las terminales. Sin embargo, sí se debe considerar que los variadores de velocidad tienen un efecto colateral que es la generación de armónicos, lo cual sí puede afectar el factor de potencia de la red de la planta, por lo que se debe considerar para corregir este problema utilizar filtros pasivos adaptativos o filtros activos. Esto se debe indicar en los aspectos eléctricos para el reemplazo.

Seguidamente, con las pruebas realizadas, también se obtuvo la curva par-velocidad para el modelo del motor de MATLAB®. Esta también se compara con la curva par velocidad del motor de ABB para verificar que los resultados sean adecuados. Esta curva se muestra en la figura 4.11.

Aquí también se ha marcado la característica de la extrusora. Se observa que, para cuando el motor se somete a una carga de 20 Nm, que es la carga de la extrusora, su velocidad es de aproximadamente 1783 rpm (446 rpm del lado de la extrusora), lo cual es muy cercano al valor de velocidad que está mostrando el motor CC con la resistencia en serie conectada. Se podría decir entonces que con este motor es muy posible cumplir con la característica par-velocidad requerida por la extrusora, según lo que se planteó en la metodología. Ya que este es un trabajo de simulación, es posible también verificar el comportamiento que tendría este motor al controlar la extrusora.

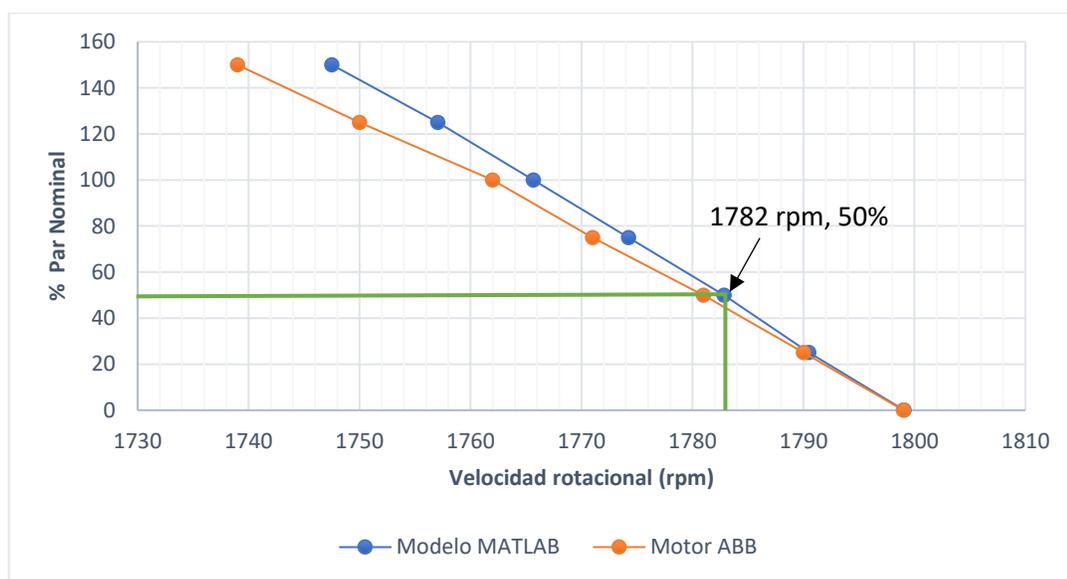


Figura 4.11 Curva par-velocidad para motor CA de 10 hp de MATLAB®. Generada con Excel.

Y también, a partir de los resultados que se obtuvieron con las pruebas de desempeño se obtiene la gráfica de corriente promedio de armadura como función del par aplicado al motor. Esta se muestra en la figura 4.12. Aquí también se ha marcado la característica de corriente que representa para el motor cuando se aplica el par que representa la extrusora. En este caso, se observa que el motor operaría con una corriente de aproximadamente 7 A, lo cual es menor, en magnitud, que el valor de corriente que utiliza el motor CC actual.

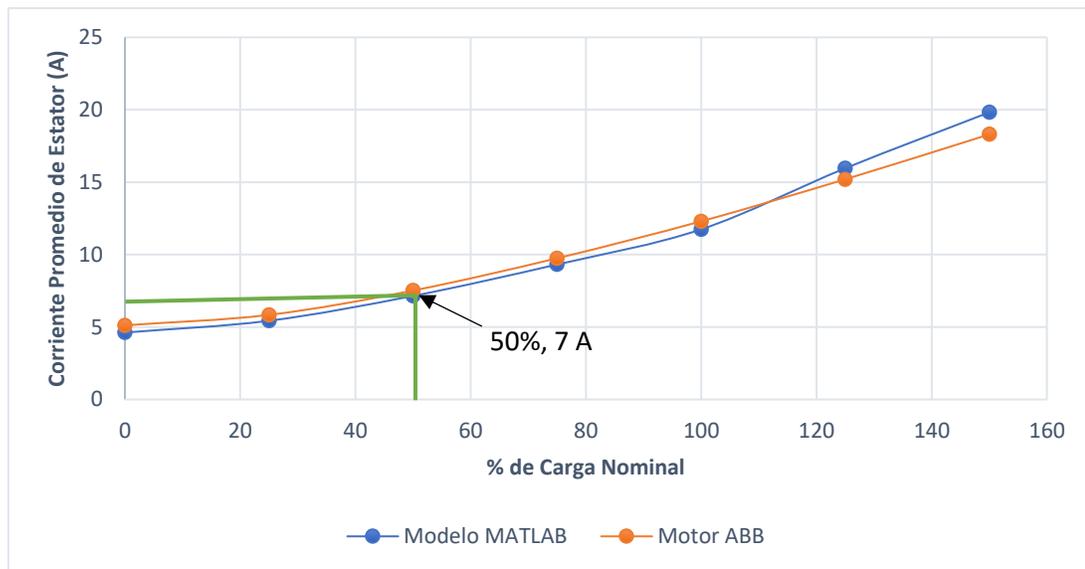


Figura 4.12 Curva corriente-par del motor CA de 10 hp. Generada con Excel.

Finalmente, también se implementó un *script* que simula el comportamiento térmico del motor CA al controlar la extrusora. Los resultados se muestran de forma gráfica en la figura 4.13, la cual es la ecuación (21) habiendo sustituido los valores numéricos de los parámetros del motor de MATLAB® y un modelo similar de ABB, tal como se muestra en (56):

$$T(t) = 25 + 57.5879 \left(1 + e^{-t/1727.6} \right) \quad (56)$$

En este caso, se utilizó un lapso de 15 horas, o 54000 segundos lo cual es prácticamente 5 veces el lapso utilizado para el motor CA, lo cual viene a mostrar el hecho de que los motores CA tardan más en calentarse que los motores CC. A partir de la gráfica, se puede decir que la temperatura alcanza un valor final de aproximadamente 83 °C, lo cual es superior, comparado con el que se obtuvo en el motor CC, de 59 °C, aunque al sistema le tomaría mucho más tiempo llegar a dicho valor.

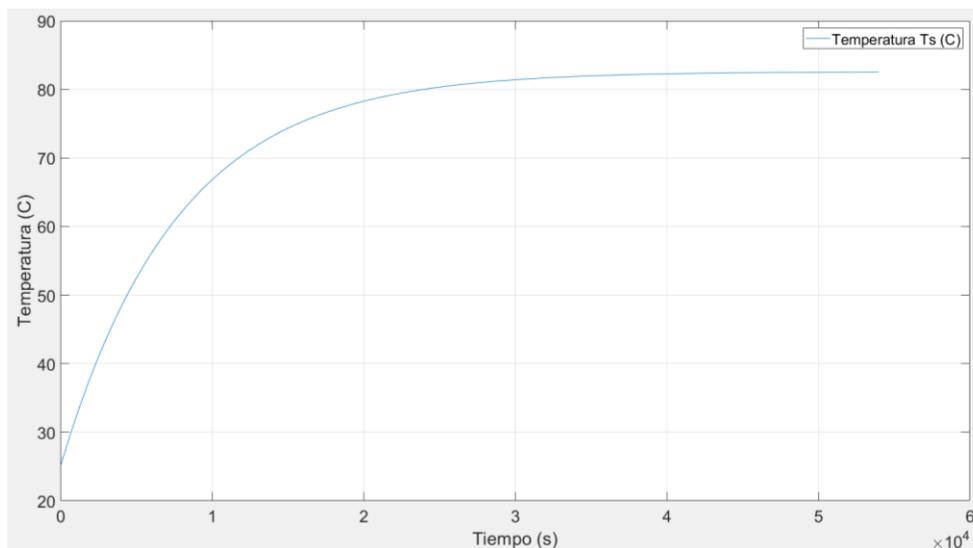


Figura 4.13 Comportamiento térmico del motor CA de 10 hp con la extrusora. Generada con MATLAB®.

Al igual que el motor CC, para este motor también se realizaron pruebas de control, en las cuales se miden tensiones, corrientes, velocidad rotacional y par de salida. Se establecen dos métodos de control que se podrían utilizar: el control vectorial indirecto con retroalimentación de corrientes y velocidad, muy similar al control para la máquina CC, y el control V/Hz sin retroalimentación o “sensorless”.

4.2.1.1 Control del motor por control vectorial indirecto con encoder

El primer método de control que se prueba con la máquina de 10 hp es el método de control vectorial indirecto con encoder. Este método busca principalmente recrear el comportamiento de la máquina CC en la máquina CA, de tal forma que se varía la tensión en el eje de cuadratura de manera proporcional a la velocidad requerida por la máquina. El sistema utilizado para este tipo de control se muestra en el apéndice AP.12. Aquí también, la caja de engranes se ha modelado únicamente como una ganancia

El diagrama se compone del motor CA, que se alimenta de un inversor trifásico fuente de tensión, el cual se alimenta a su vez de dos fuentes CC simétricas con valor de 376 V cada una, ya que esta es los sensores amplitud de tensión fase-neutro del motor. Las fuentes CC simulan el DC-link de un inversor real. Los transistores del inversor son controlados por el bloque de modulador PWM, el cual es integrado y viene en la biblioteca de Simulink®. Este bloque toma las tensiones de referencia en los ejes ABC y la tensión pico que saldría del inversor y con eso aplica un algoritmo de modulación por vector espacial (SVPWM, por sus siglas en inglés). Las tensiones de referencia para los ejes ABC vienen del bloque que pasa del sistema $\alpha\beta$ al sistema ABC, y este a su vez toma su entrada del bloque que pasa del sistema dq al sistema $\alpha\beta$.

Como se mencionó en el marco teórico, el control de la máquina en este caso se realiza en el sistema dq , de ahí que se utilicen dos bloques de conversión. También se debe observar que, tal como se indicó, al ser un tipo de control a lazo cerrado, se retroalimentan las corrientes del estator y la velocidad rotacional, ya que, al igual que en el caso del motor CC, el control se realiza en cascada, de tal forma que el valor deseado de la corriente del eje de cuadratura viene del controlador de velocidad. En el caso de las corrientes, estas se retroalimentan en el sistema ABC, por lo que deben convertirse al sistema $\alpha\beta$, y luego al sistema dq .

Ya que el sistema dq se considera estacionario, se debe referir la dinámica del rotor al eje sincrónico. Esto se logra convirtiendo la velocidad rotacional medida en una velocidad eléctrica, multiplicando su valor por los pares de polos de la máquina, y sumando este resultado con la velocidad de deslizamiento y pasándolo por un bloque de integración para obtener la posición en el eje sincrónico. Este resultado final se utiliza tanto para la retroalimentación de las variables como para los valores deseados que salen de los controladores de las corrientes en los ejes dq .

Para los gráficos de las variables, estas se exportan de Simulink® hacia MATLAB®, donde posteriormente se grafican, mostrando en la mayoría de los casos tanto el valor deseado de la variable como el valor medido. En el caso del control vectorial indirecto, no solo se tienen las variables “naturales”, sino que también se deben revisar las variables de los ejes dq . Para el caso de los sistemas en CA, el tiempo de la simulación también fue de 30 segundos, pero se usó una frecuencia de muestreo de 1MHz. Esto, debido a que, al utilizar una frecuencia de 100 kHz, la resolución de las gráficas no era adecuada, por lo que se decidió aumentar esta frecuencia hasta que las gráficas tuvieran una resolución aceptable. Los transistores conmutan a una frecuencia, en este caso, de 4 kHz

La sintonización de los controladores, como se mencionó en el marco teórico, se realiza a través del método del LGR. Para el caso de los controladores de corriente, al sustituir los parámetros del motor en la ecuación (48), se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$P_e(s) = \frac{1}{0.6837 + 0.008191s} \quad (57)$$

La función de transferencia que se muestra en (57) es la que se introduce en la herramienta de *rltool* de MATLAB® y se sintoniza el controlador. Al final, utilizando este método, se obtiene que $K_p = 10.379 \Omega$ y $T_i = 1255 s$. Puesto que se demostró que la planta eléctrica es la misma tanto para el controlador de la corriente de eje directo, como el controlador de la corriente de eje de cuadratura, por lo que los parámetros para estos dos controladores serían los mismos. La sintonización se realizó de tal forma que el sistema planta con a lazo cerrado tiene una frecuencia de corte de 200 Hz.

El valor deseado de la corriente de eje directo es la corriente del motor en vacío, la cual se midió en la prueba de desempeño, mientras que el valor deseado de la corriente de cuadratura viene del controlador de velocidad, similar al control en cascada del motor CC. A estos controladores también se les añadió la saturación de la salida, para evitar el desbordamiento de la parte integral. El valor máximo de tensión que pueden poner en su salida es ± 376 V, que es el valor de amplitud fase a neutro que puede soportar el motor.

De manera como se hizo con el motor CC, una vez sintonizado el lazo de corriente, se procede a sintonizar el lazo de velocidad. De manera como se hizo con el controlador de corriente en este caso, se utiliza la técnica de sintonización por LGR. En este caso, se sustituyen los parámetros mecánicos del motor en la ecuación (52) y se obtiene la siguiente función de transferencia mecánica:

$$P_m(s) = \frac{1.2602}{0.008141 + 0.05s} \quad (58)$$

Esta función también se introduce en la herramienta *rltool* y con la ayuda de las consideraciones descritas en el marco teórico, se sintoniza el controlador de velocidad. Para este caso, se obtuvo $K_p = 4.9579$ As/rad y $T_i = 125.5$ s. Este lazo se diseñó de tal forma que la frecuencia de corte a lazo cerrado es de 20 Hz. La saturación de este controlador se puso en ± 16 A.

Una vez que ambos lazos están sintonizados, se realiza la simulación y se obtienen las gráficas. Empezando por la velocidad, la curva correspondiente se muestra en la figura 4.14. Como se puede observar, el controlador de corriente cumple su función de manera bastante adecuada, ya que, desde el punto de vista del servocontrol, la referencia de velocidad, mostrada en la curva de color magenta, y la velocidad rotacional medida, representada por la curva de color verde, prácticamente están superpuestas, lo que indica que el motor sigue las consignas de velocidad correctamente.

Luego, se muestra la curva de torque en función del tiempo, en la figura 4.15. Como se puede ver, el par que representa la carga se muestra en color magenta, que alcanza el valor estacionario de 80 N m, mientras que el par desarrollado por la máquina es la curva verde.

Evalutando el comportamiento de la curva, se observa que el motor sigue la consigna de la carga, ya que la forma de la curva es prácticamente la misma. Además, se observa que, cuando se realizan los cambios en las consignas de velocidad, el par cambia levemente, para luego volver a un valor cercano al par de carga, lo cual muestra que, aunque estos controladores están diseñados como servocontroladores, tienen una capacidad de control regulatorio aceptable.

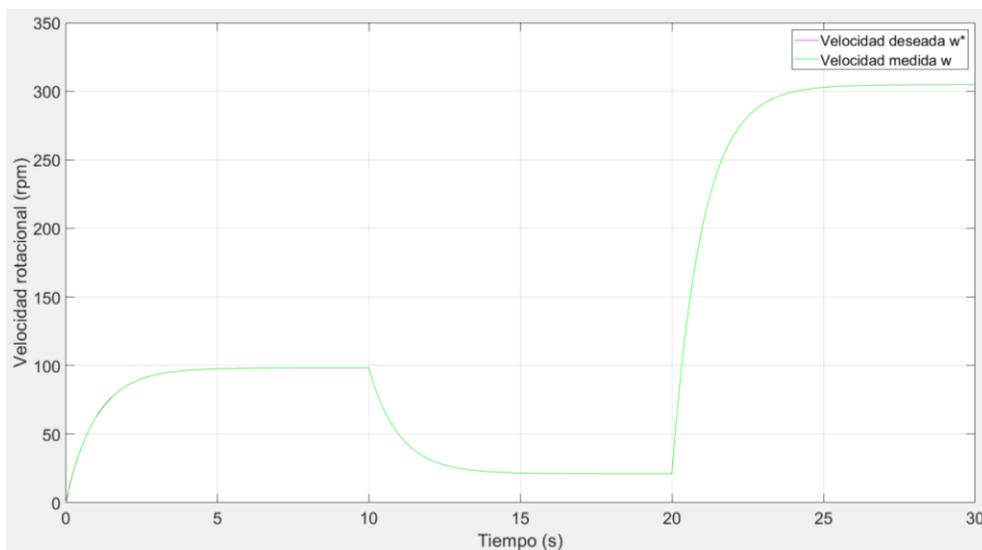


Figura 4.14 Curva de velocidad rotacional en función del tiempo para motor CA de 10 hp. Generada con MATLAB®.

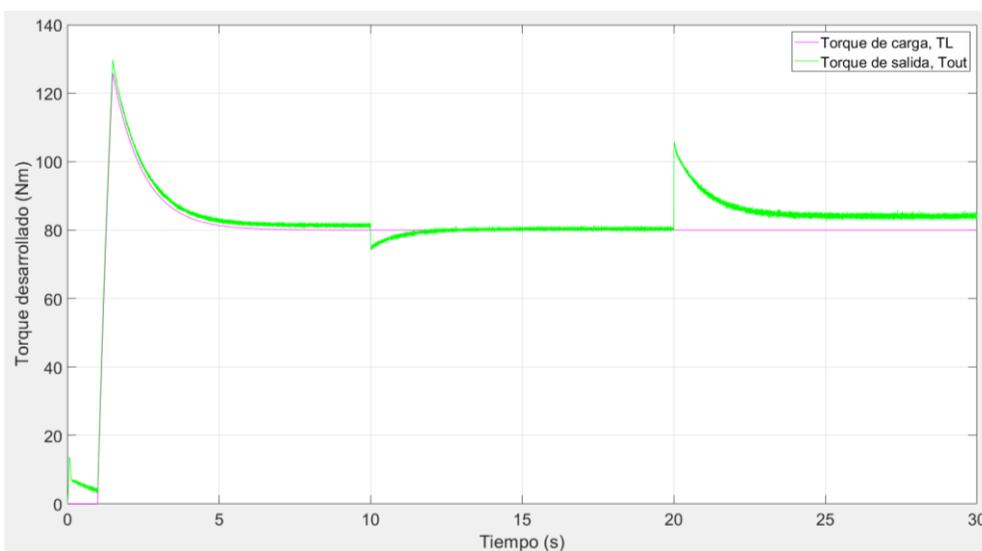


Figura 4.15 Par desarrollado por el motor CA de 10 hp y la consigna de par, en función del tiempo. Generada con MATLAB®.

Pasando ahora a las variables eléctricas, se tiene dos grupos: las variables eléctricas en el sistema ABC , y las variables eléctricas en el sistema dq . Se analizan ambos grupos.

Empezando por las variables en el sistema ABC , la gráfica que muestra las tensiones de la máquina en el estator, en función del tiempo, se muestra en la figura 4.16. En dicha gráfica, se muestran tanto los valores deseados, es decir, los valores que ponen los controladores dq pasados al sistema ABC , y los valores de tensión que se miden en el inversor. Como se ha explicado antes, la salida del inversor trifásico es una tensión PWM, por lo que se aplica un filtro pasabajos, con frecuencia de corte de 60 Hz para mostrar las formas de onda apropiadamente. Las formas de onda son bastante similares, aunque se observa muy claramente que las tensiones provenientes del controlador tienden a ser ligeramente mayores que las tensiones que suministra el inversor trifásico.

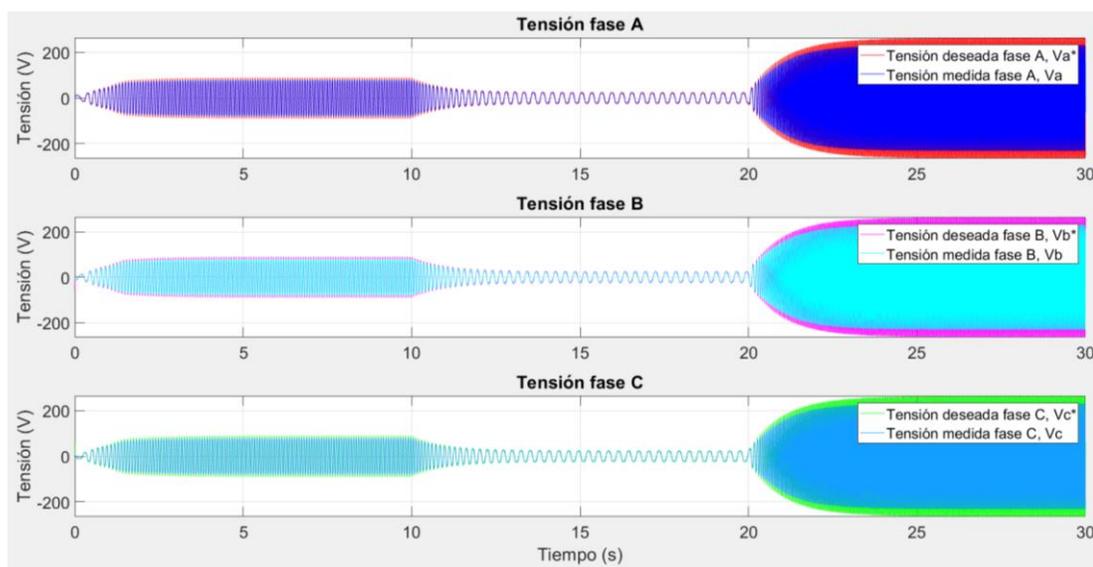


Figura 4.16 Formas de onda medidas y deseadas para la tensión de estator del motor CA de 10 hp. Generadas con MATLAB®.

Luego, se analizan las corrientes en el sistema ABC , en la figura 4.17. Se muestran tanto los valores deseados de corriente, que son los valores de las corrientes dq transformados al sistema ABC , como los valores medidos en el estator de la máquina. En este caso, se observa que las formas de onda están superpuestas, es decir, los valores medidos están encima de los valores deseados, por lo que los controladores están siguiendo de manera bastante fiel los valores deseados de corriente.

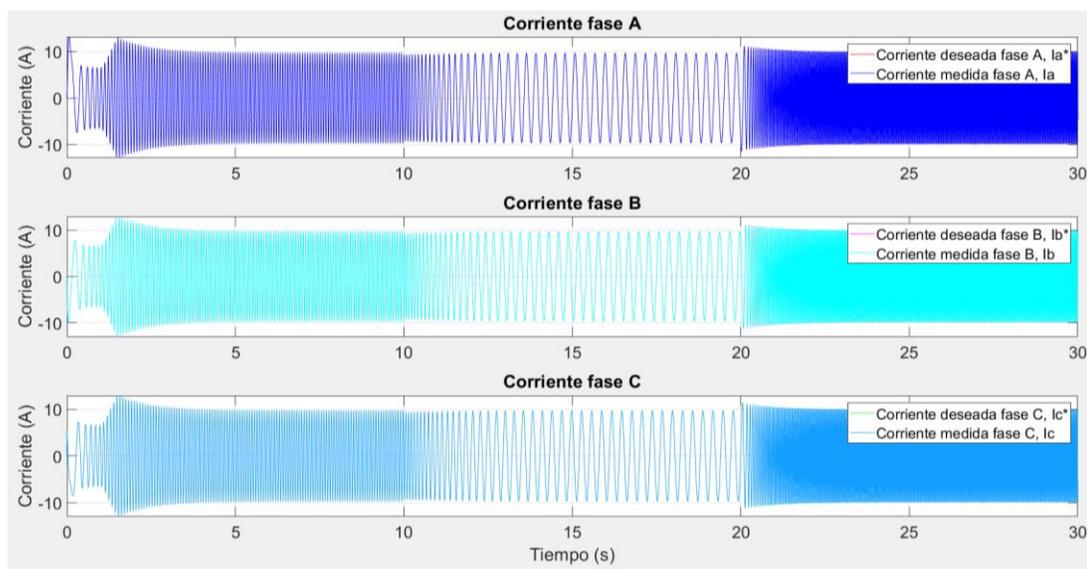


Figura 4.17 Corrientes de estator del motor CA de 10 hp. Valores deseados y medidos. Generados con MATLAB®.

Ahora que se han analizado los valores en el sistema ABC , se procede a revisar los resultados obtenidos para el sistema dq . Empezando por las corrientes. La gráfica que muestra el comportamiento de la corriente de eje directo se muestra en la figura 4.18. Como se mencionó en el marco teórico, en el caso del control vectorial indirecto, la corriente de eje directo utiliza un valor constante, que es la corriente de vacío del motor, como valor deseado o de referencia. Para el caso de este motor, esta corriente tiene un valor de 6.538 A y se representa con la línea roja, mientras que la corriente de eje directo que se mide, que viene del motor, se muestra con la línea verde, superpuesta a la roja. Se observa viene también bastante ruidosa, lo cual no se pudo eliminar debido a las limitaciones del hardware.

Por otro lado, también se tiene la corriente de cuadratura. Su valor deseado y la corriente medida se muestran en la figura 4.19. En este esquema de control, el valor deseado de esta corriente viene del controlador de velocidad, y la corriente que se mide viene del motor. Se observa que, para el caso de esta corriente, el controlador también sigue de manera bastante adecuada el valor deseado de corriente de cuadratura impuesto por el controlador de velocidad. Al igual que en el caso del controlador de corriente de eje directo, la señal que viene del motor también está bastante ruidosa, pero su forma de onda, en general, es bastante similar a la del valor deseado, por lo que se puede concluir que los controladores están bien diseñados.

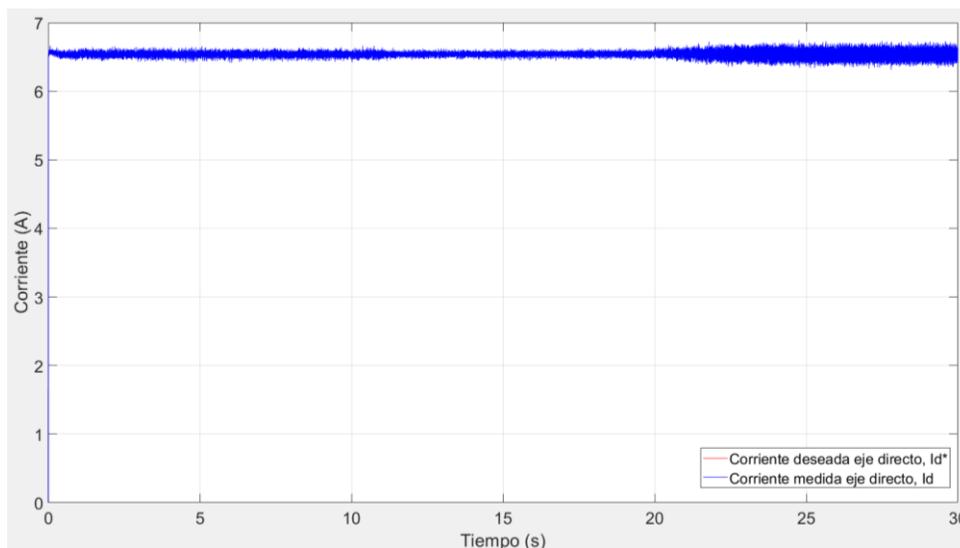


Figura 4.18 Corriente de eje directo medida y su valor deseado para el motor CA de 10 hp. Generada con MATLAB®.

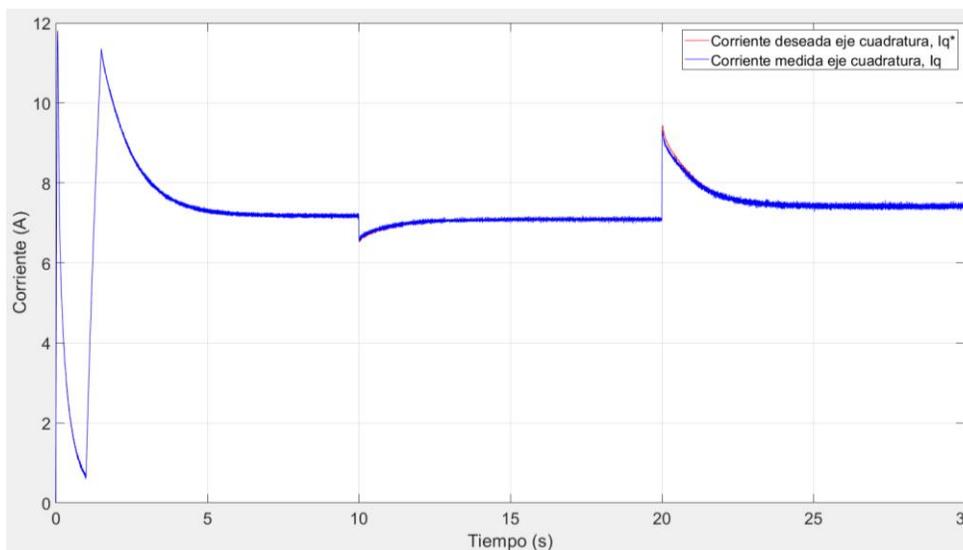


Figura 4.19 Valores deseado y medido para la corriente de eje de cuadratura del motor CA de 10 hp. Generados con MATLAB®.

Finalmente, se analizan las tensiones en los ejes dq . Los valores medidos de estas variables se muestran en la figura 4.20. Para el caso de las tensiones, solo se obtuvieron los valores deseados, es decir, las salidas de los controladores de corrientes. Se observa que su comportamiento es bastante similar al de la máquina CC, especialmente para la tensión del eje de cuadratura, lo cual es el objetivo principal de esta metodología de control.

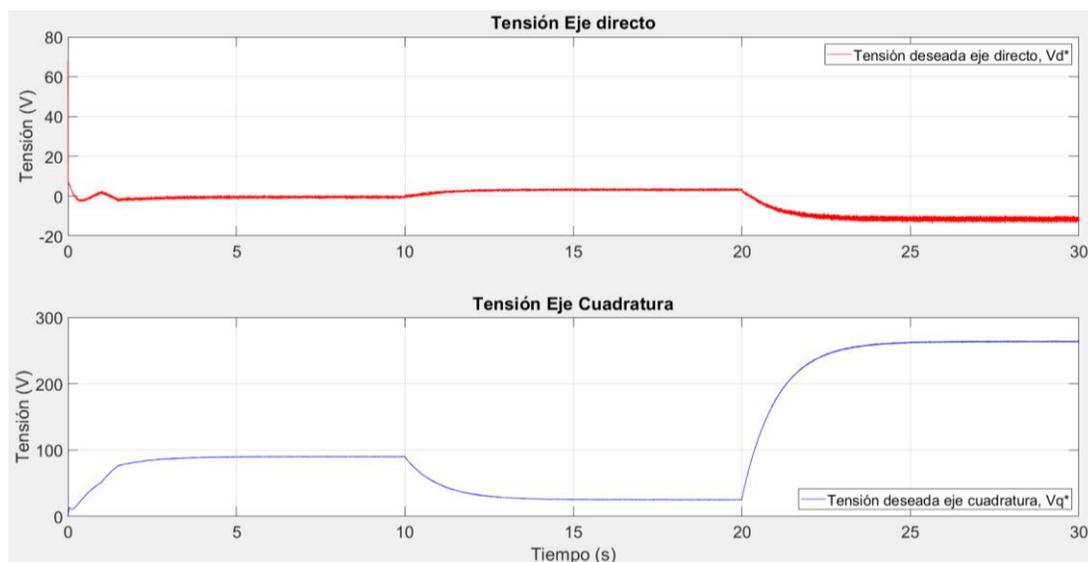


Figura 4.20 Tensiones dq del motor CA de 10 hp. Valores deseados. Generados con MATLAB®.

4.2.1.2 Control del motor por control V/Hz sensorless

El otro método de control que se evalúa con este motor, es el control V/Hz. Como se mencionó en el marco teórico, este es un esquema de control a lazo abierto, en el cual la relación entre la frecuencia del rotor y la tensión aplicada al motor se mantienen en un valor constante, que es flujo de campo magnético en el entrehierro de la máquina. Se le dice “sensorless”, ya que este esquema no utiliza retroalimentación de velocidad. En su lugar, el variador de frecuencia realiza un cálculo a lo interno para ajustar la tensión que suministra a la máquina y se considera que el valor de velocidad impuesto a la máquina es, efectivamente, el que se obtiene.

El montaje para este tipo de control se muestra en el apéndice AP.13. Este montaje es mucho más sencillo, puesto que el control V/Hz es un bloque integrado que ya está incluido en la biblioteca de Simulink®, por lo que no fue necesario diseñar este controlador, a diferencia del controlador vectorial indirecto. A este bloque se le introducen las consignas de frecuencia y el bloque pone las consignas de tensión a su salida. Aunque es un control a lazo abierto, y no existe retroalimentación de las variables, de igual manera se muestran tanto la velocidad deseada, convirtiendo la frecuencia deseada en velocidad, como la velocidad medida, en el eje del rotor. Asimismo, también se muestran los valores deseados y medidos de las tensiones del estator.

Al igual que el control vectorial indirecto, esta simulación se realiza con una frecuencia de muestreo de 1 MHz, en un intervalo de tiempo de 30 segundos, con tres cambios en la velocidad deseada. La frecuencia de conmutación de los transistores se definió en 4 kHz.

Para este caso también se exportan los datos de las variables eléctricas y mecánicas del sistema en función del tiempo a MATLAB® para ser graficadas.

Una vez realizada la simulación, se obtienen los resultados, los cuales se comentan a continuación. Empezando por la velocidad medida, mostrada en la figura 4.21. Para este caso, se observa que la curva azul, que es la velocidad rotacional medida, no está exactamente arriba de la curva roja, que es la frecuencia deseada, convertida a rpm, lo cual implica que existe un pequeño error permanente. Además, la curva azul tiene algunas irregularidades a lo largo de la curva, a diferencia del controlador vectorial donde la curva de velocidad era bastante lisa. Aun así, se observa que el motor sigue la consigna de velocidad muy de cerca.

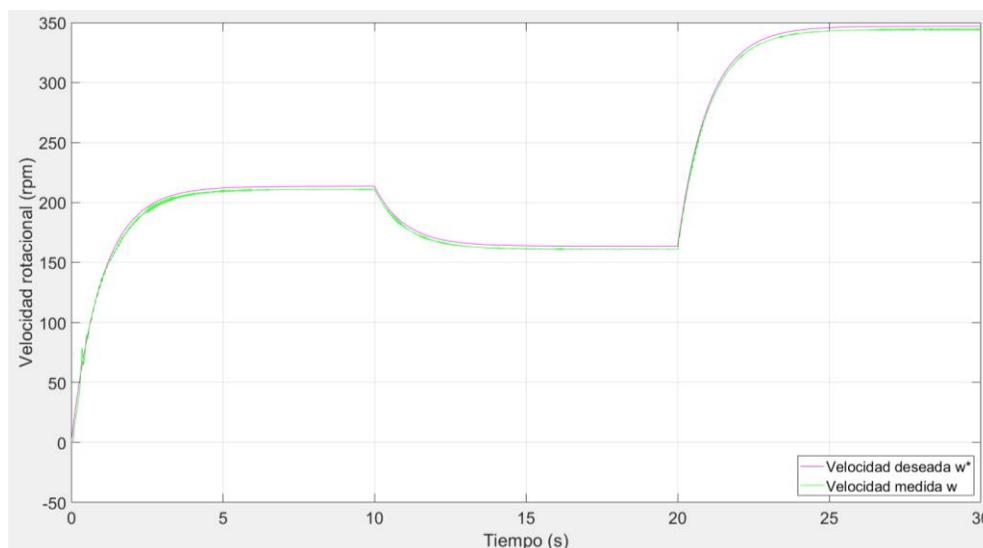


Figura 4.21: Velocidad rotacional medida y la consigna de frecuencia, convertida en rpm, para el motor CA de 10 hp con control V/Hz. Generada con MATLAB®.

Seguida de la velocidad, se muestra el par desarrollado por la máquina y el par de carga que representa la extrusora. Esta variable se muestra en la figura 4.22. Para este caso, se observa que, al igual que el caso del control vectorial indirecto, el torque medido presenta bastante ruido, pero este método de control también muestra algunos picos de torque, especialmente a la entrada de la carga, donde se observa un pico de casi 50 Nm. Sin embargo, pasado el punto de acople de la carga, la curva de par medido se superpone a la del par de carga, de una manera un poco mejor a como lo hizo el control vectorial, especialmente para el último cambio de velocidad en $t = 20$ segundos.

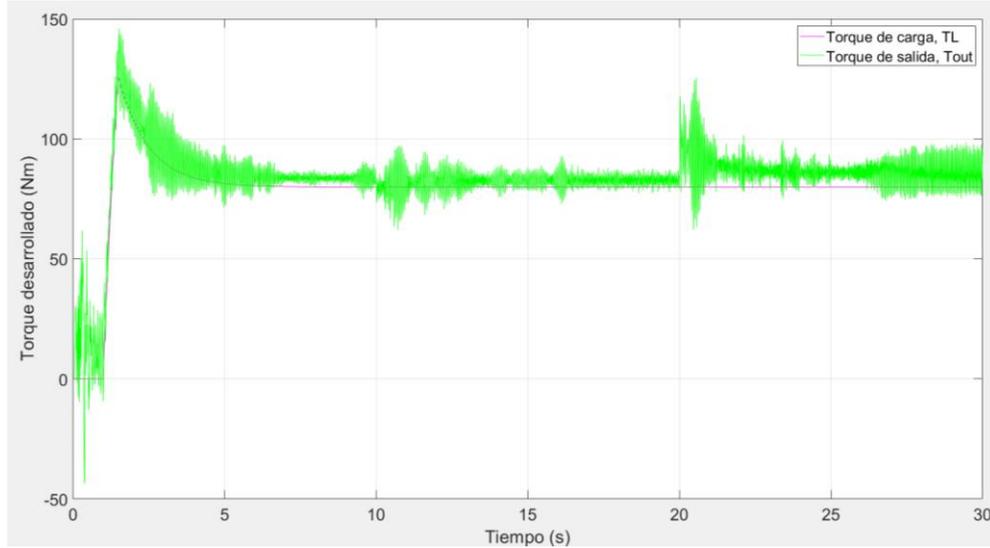


Figura 4.22: Par de carga y par desarrollado por el motor CA de 10 hp con control V/Hz.
Generado con MATLAB®.

Por otro lado, también se evalúan las variables eléctricas del sistema. En este caso, no se realiza una conversión entre sistemas de referencia, sino que solo se miden las tensiones en el estator, o sistema *ABC*. Empezando por las tensiones, estas se muestran en la figura 4.23. Para este caso, se observa que las tensiones se comportan de una forma muy similar al caso del variador vectorial, puesto que las formas de onda de las tensiones *ABC* que vienen de los controladores son muy similares a las que salen del inversor. Al igual que en el caso del inversor, las tensiones de estator deseadas son ligeramente más altas que las que entrega el inversor.

Finalmente, para este motor, también se miden las corrientes de estator. Estas se muestran en la figura 4.24. Para este caso, no se tienen valores deseados de las corrientes, puesto que el bloque solo recibe consignas de frecuencia y genera consignas de tensión. Para el caso de este esquema de control, se observa que las corrientes también tienen un comportamiento similar al del variador vectorial, con la excepción de que, al arranque, cuando se incluye la carga, las corrientes tienden a distorsionarse en sus formas de onda, debido principalmente a la variación de par.

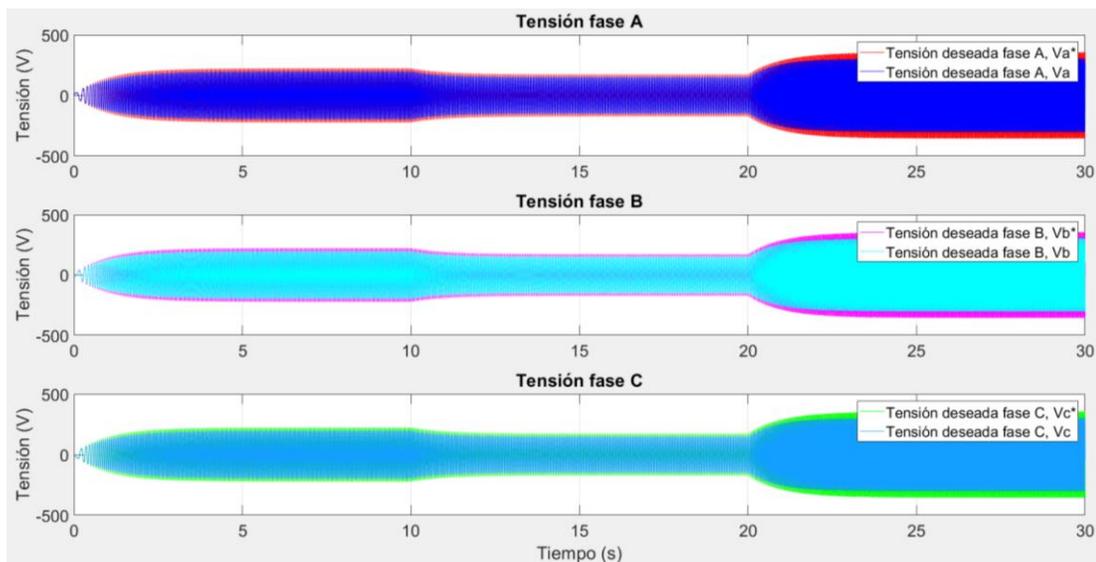


Figura 4.23: Tensiones deseadas y medidas para el estator del motor CA de 10 hp con control V/Hz. Generadas con MATLAB®.

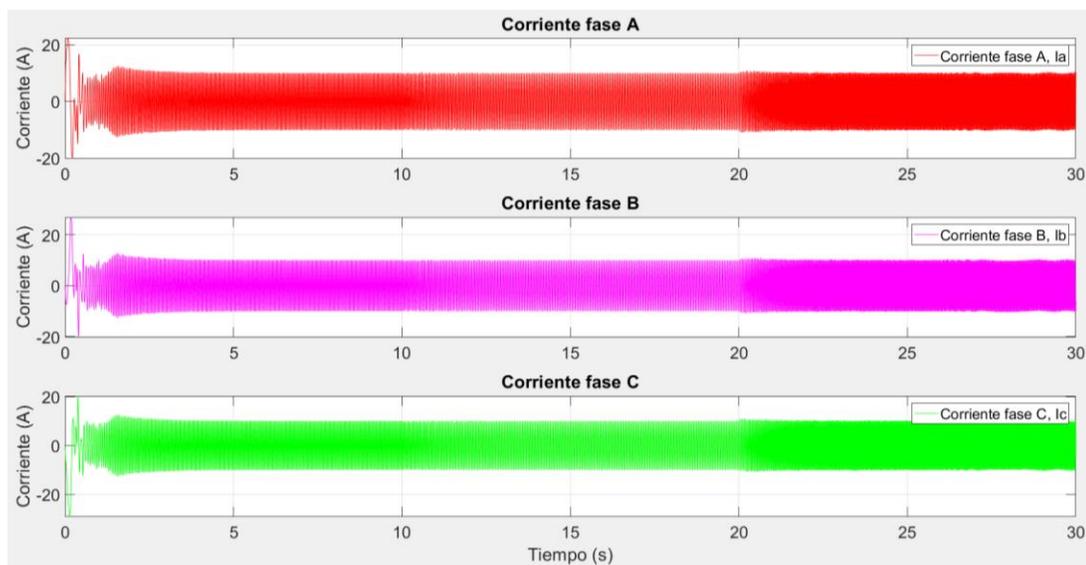


Figura 4.24: Corrientes de estator medidas para el motor CA de 10 hp con control V/Hz. Generadas con MATLAB®.

4.2.2 Motor CA de 5 hp

El segundo motor que se revisa, siguiendo la metodología propuesta, y de acuerdo con la disponibilidad de la biblioteca de Simulink®, es el motor CA de 5 hp. Los datos de este motor se muestran en la tabla 4.4. Para este motor, al igual que el anterior, se realizaron las mismas pruebas, y se obtuvieron los respectivos resultados. Esto se hace con el fin de comparar estos con los de la máquina CC y con el motor CA anterior y tener un mejor panorama de la situación.

Tabla 4.4: Parámetros del motor CA de 5 hp.

| Parámetro | Valor |
|---|----------|
| Potencia nominal (hp) | 5 |
| Velocidad nominal (rpm) | 1750 |
| Corriente nominal (A) | 6.5 |
| Tensión nominal (V) | 460 |
| Frecuencia nominal (Hz) | 60 |
| Eficiencia nominal (%) | 90 |
| Factor de potencia nominal (%) | 81 |
| Resistencia del estator (Ω) | 1.115 |
| Inductancia de dispersión del estator (H) | 0.005974 |
| Resistencia del rotor (Ω) | 1.083 |
| Inductancia de dispersión del rotor (H) | 0.005974 |
| Inductancia mutua (H) | 0.2037 |
| Inercia rotacional (kg m^2) | 0.02 |
| Coefficiente de fricción viscosa (Nm s) | 0.005752 |
| Pares de polos | 2 |

Con estos parámetros es que se realizan las sintonizaciones, especialmente para las pruebas de control con control vectorial indirecto que se muestran más adelante. Por ahora, se muestran principalmente los resultados obtenidos de las pruebas de desempeño.

Nuevamente, se siguen los lineamientos establecidos en el estándar CSA 390-10 para este motor. El montaje empleado para realizar esta prueba es el mismo que se muestra en el apéndice AP.11, cambiando únicamente el bloque del motor. Al realizar las pruebas y graficar los resultados de eficiencia en función del porcentaje de carga nominal, se obtiene la curva de la figura 4.25. Para este caso también se ha marcado la característica de par de la extrusora en la gráfica. En este caso, el par nominal del motor es de 20.35 N m, por lo que la carga de 20 N m que representa la extrusora es prácticamente el 100% del par nominal de la máquina. Al marcar este punto en la gráfica, se observa que el motor estaría trabajando con una eficiencia de casi el 90%, lo cual también es mucho mayor que la eficiencia con la cual opera el motor CC al controlar la extrusora. Al igual que el caso del motor de 10 hp de CA,

para este motor también se buscaron datos de un motor real de ABB y se graficaron en conjunto, con el fin de verificar la validez de los resultados.

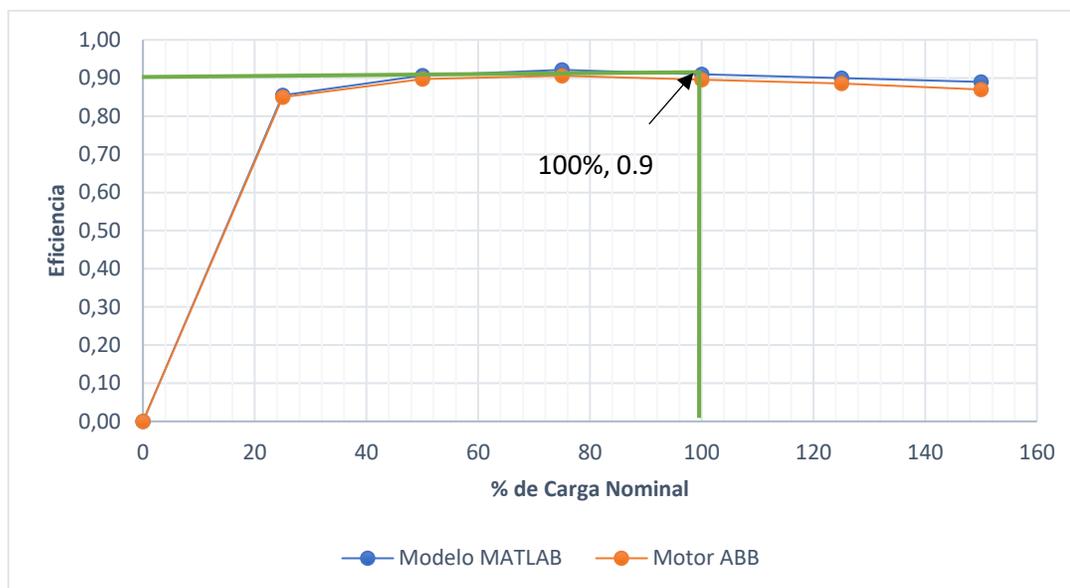


Figura 4.25: Curva de eficiencia contra carga nominal, motor CA de 5 hp. Generada con Excel.

Seguidamente, también se obtuvo la curva par velocidad de este motor. Esta se muestra en la figura 4.26. Aquí se marcó la característica par velocidad de la extrusora, y se observa que, para este caso, la velocidad que desarrolla el motor es de aproximadamente 1758 rpm, que es equivalente a 440 rpm del lado de la extrusora, lo cual es bastante cercano al valor obtenido con el motor CC con la resistencia serie conectada.

Asimismo, al igual que para el motor de 10 hp, se obtuvo la curva de factor de potencia en función de la carga. Para este motor, al controlar la extrusora, operaría con un factor de potencia de aproximadamente 0,81, lo cual es más alto que el factor de potencia del motor anterior. Lo anterior se muestra en la figura 4.27.

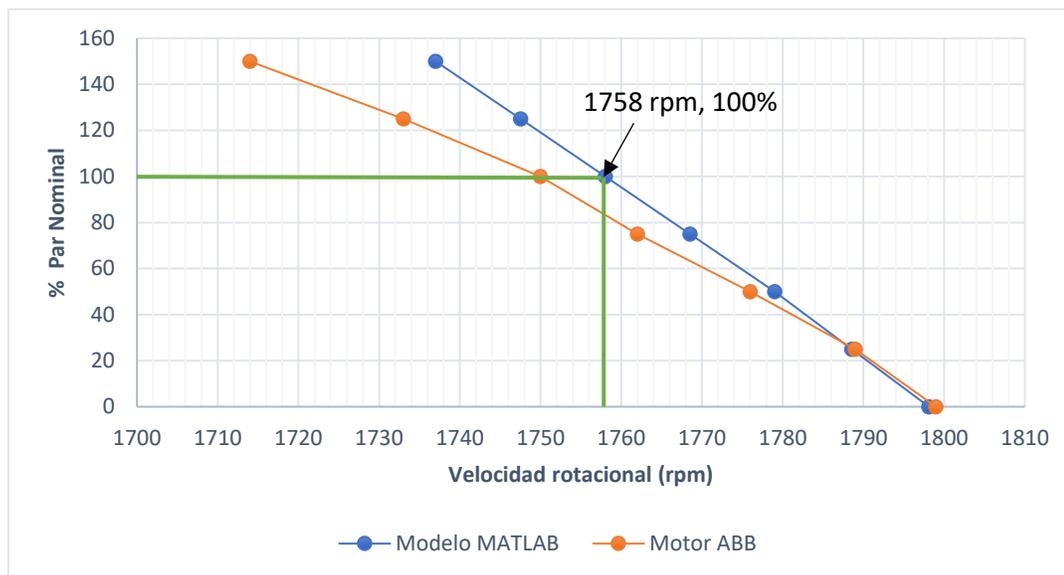


Figura 4.26: Curva par-velocidad para el motor CA de 5 hp. Generada con Excel.

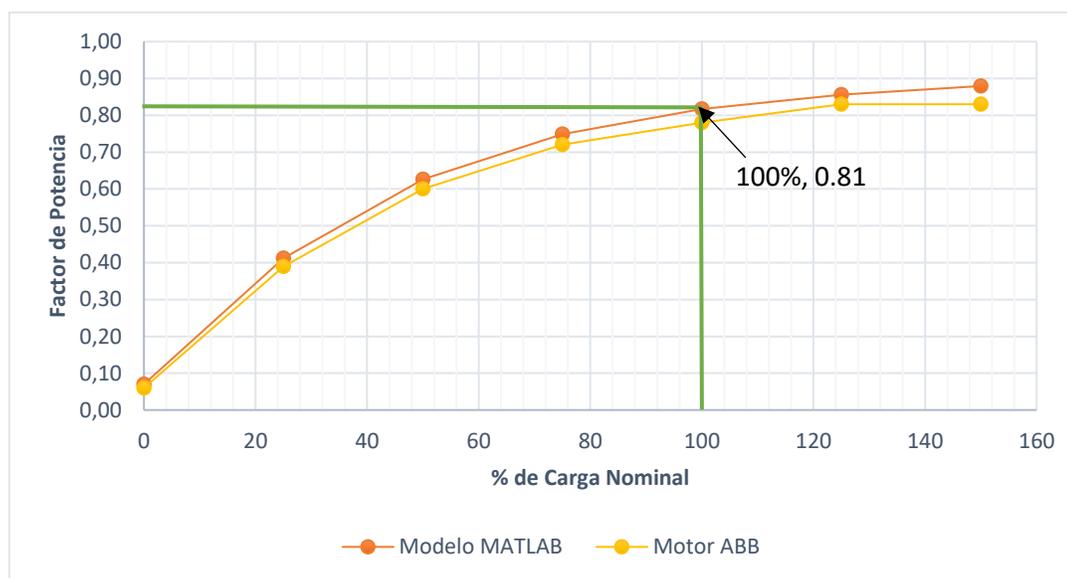


Figura 4.27: Factor de potencia en función de la carga del motor. Generada con Excel.

Y, finalmente, a partir de estas pruebas, también fue posible obtener la curva que denota la corriente en función del par aplicado al motor. Esta gráfica se muestra en la figura 4.28. Al igual que el motor de 10 hp, esta curva también muestra un comportamiento de función potencia, y también muestra que los resultados obtenidos son bastante fidedignos, ya que se muestran los datos de un motor análogo de ABB. Para este caso también se marcó el valor

de corriente con el cual opera el motor en caso de que este manejara la extrusora, sería de 6.5 A, lo cual es un poco menos que lo que consume el motor de 10 hp.

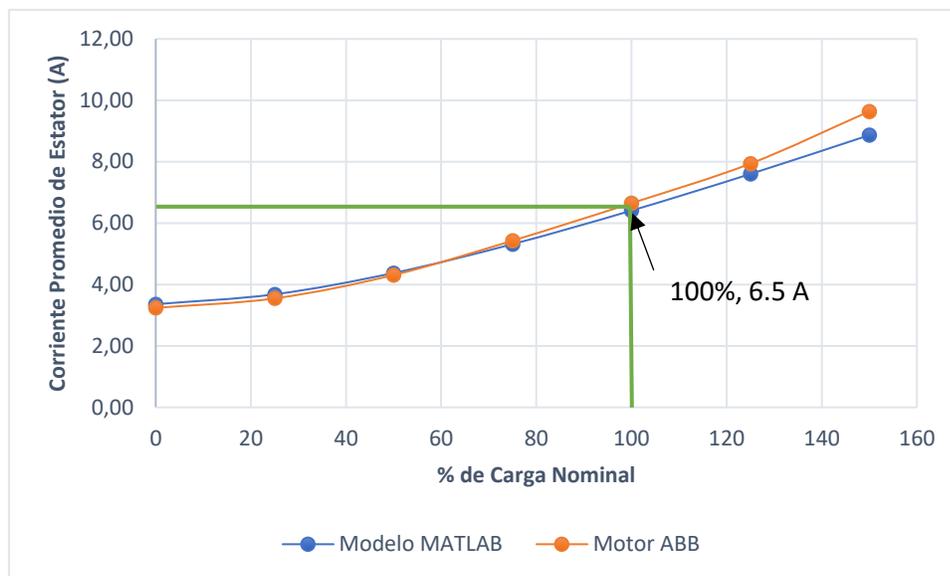


Figura 4.28: Curva de corriente de estator con respecto a la carga aplicada al motor de 5 hp. Generada con Excel.

Para este motor también fue posible realizar un modelo térmico y graficar la evolución de la temperatura con respecto al tiempo. Nuevamente en este caso, se utilizó el valor RMS de la corriente de estator cuando controla la extrusora, y la resistencia de estator. Los otros parámetros se obtuvieron de la hoja de datos del motor de ABB. Al sustituir estos valores en la ecuación (21), se obtiene la siguiente función de temperatura:

$$T(t) = 25 + 83.9701 \left(1 + e^{-t/3921.8} \right) \quad (59)$$

Al graficar esta función, en un intervalo de tiempo de 54000 segundos, igual que el motor CA anterior, se obtiene la curva que se muestra en la figura 4.29. Para el caso de este motor, a partir de la curva, se deduce que la temperatura en el estacionario es de aproximadamente 109 °C, lo cual es mucho que la temperatura que alcanza el motor CC o la que alcanza el motor CA de 10 hp.

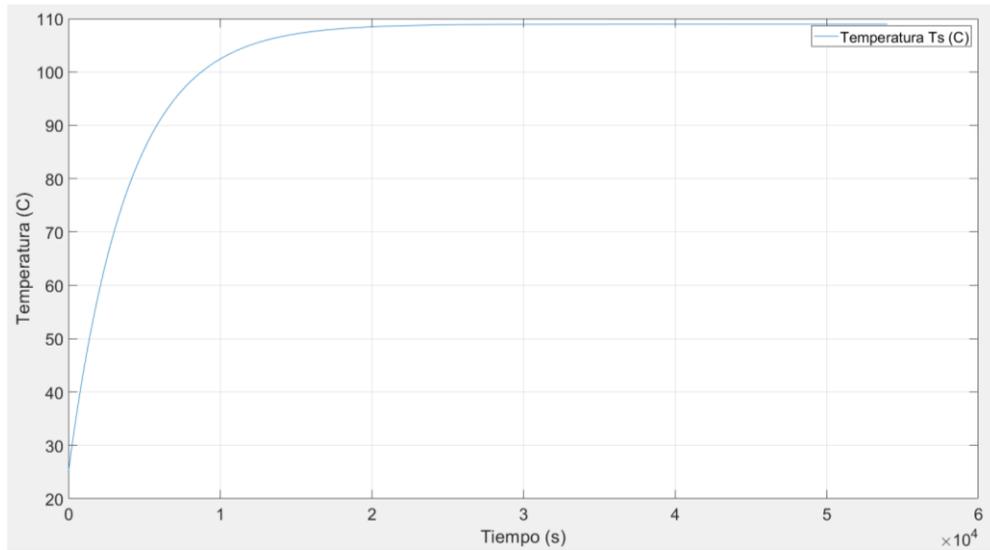


Figura 4.29: Temperatura del motor CA de 5 hp en función del tiempo. Generada con MATLAB®.

4.2.2.1 Control del motor por control vectorial indirecto con encoder

Ahora que se mostraron las características de desempeño y comportamiento térmico del motor, se evalúan las características de control. Nuevamente, para este motor también se realizaron pruebas de control tanto en control vectorial indirecto con encoder como control V/Hz sensorless.

El montaje para este motor fue el mismo que se muestra en el apéndice AP.12, cambiando el bloque del motor y resintonizando los controladores para ajustarlos al nuevo motor. En el caso del lazo de corriente, al sustituir los valores numéricos de los parámetros de este motor en la ecuación (49), se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$P_e(s) = \frac{1}{1.115 + 0.01178s} \quad (60)$$

Nuevamente, para este motor también se emplea la técnica de sintonización por el LGR. Se utiliza la herramienta *rltool* de MATLAB® con esta función de transferencia y se obtienen los parámetros del controlador. Se utilizan los mismos requisitos de diseño del controlador que se mencionaron en el marco teórico, sobre error permanente y frecuencia de corte a lazo cerrado. Los controladores de corriente para este caso también se sintonizaron con frecuencia de corte de 200 Hz. Al final se obtuvo que $K_p = 14.829 \Omega$ y $T_i = 1257 s$. La saturación de estos controladores también se fijó en $\pm 376 V$

Una vez sintonizados los lazos de corriente, se sintoniza el lazo de velocidad. Para este lazo, al igual que el motor anterior, se tomó la ecuación (52) y se sustituyen los valores numéricos de los parámetros de este motor en dicha ecuación. Para este caso, la corriente de vacío medida fue de 4.761 A, lo cual corresponde al valor deseado de la corriente del eje directo. Al final se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$P_m(s) = \frac{1.2563}{0.005752 + 0.02s} \quad (61)$$

La ecuación (61) es la función de transferencia mecánica para este motor. Esta también se inserta en el *rltool* de MATLAB® para sintonizar el controlador. Se debe recordar que este lazo debe tener una frecuencia de corte de entre 10 y 20 Hz. Para este caso se escogió 20 Hz. Con las consideraciones de diseño, se obtuvo $K_p = 2.0083 \text{ As/rad}$ y $T_i = 125.7 \text{ s}$ y la saturación de este controlador se fijó en $\pm 16 \text{ A}$. Una vez que ambos lazos están sintonizados, se conecta el control en cascada y se realiza la simulación. Para este motor, el tiempo de simulación también fue de 30 segundos, con tres cambios en la consigna de velocidad y con frecuencia de muestreo de 1 MHz. Se examinan las mismas variables que se evaluaron en el caso homólogo del motor CA de 10 hp.

Empezando por la velocidad rotacional. La gráfica que muestra esta variable en función del tiempo se muestra en la figura 4.30. Para este caso también se observa que ambas curvas, valor deseado y valor medido, se superponen, lo que implica que no hay error permanente en el control de velocidad. Además, la forma de onda es bastante lisa, característica que también se observa el control vectorial del motor CA de 10 hp.

Seguidamente, también se muestra la curva de par de carga y par desarrollado por el motor con respecto al tiempo, ambos, en la figura 4.31. Al igual que el motor anterior, la curva azul, que muestra el torque desarrollado por la máquina se muestra demasiado ruidosa, debido a la frecuencia de muestreo utilizada. Aun así, por la forma de onda, se observa claramente que el motor tiende a mantener un par en su flecha de un valor similar al par de la carga, que sería la extrusora.

Luego de analizar las variables mecánicas, se pasan a las eléctricas, en el sistema *ABC*. Empezando por las tensiones, las formas de onda para las tensiones se muestran en la figura 4.32. Se grafican tanto los valores deseados de las tensiones, es decir, los valores que vienen de los controladores *dq* pasados al sistema *ABC*, y los valores medidos a la salida del inversor trifásico. Se observa claramente que los valores deseados son ligeramente superiores. Igualmente, la amplitud de las ondas varía de manera proporcional a la velocidad requerida, al igual que sucede con el motor CA de 10 hp.

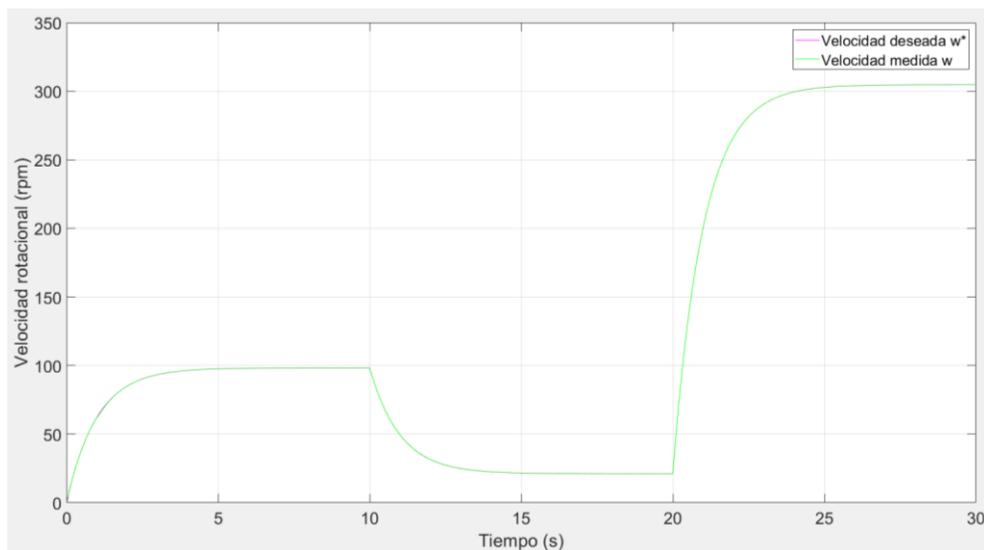


Figura 4.30: Velocidad rotacional del motor CA de 5 hp. Valores deseado y medido. Generados con MATLAB®.

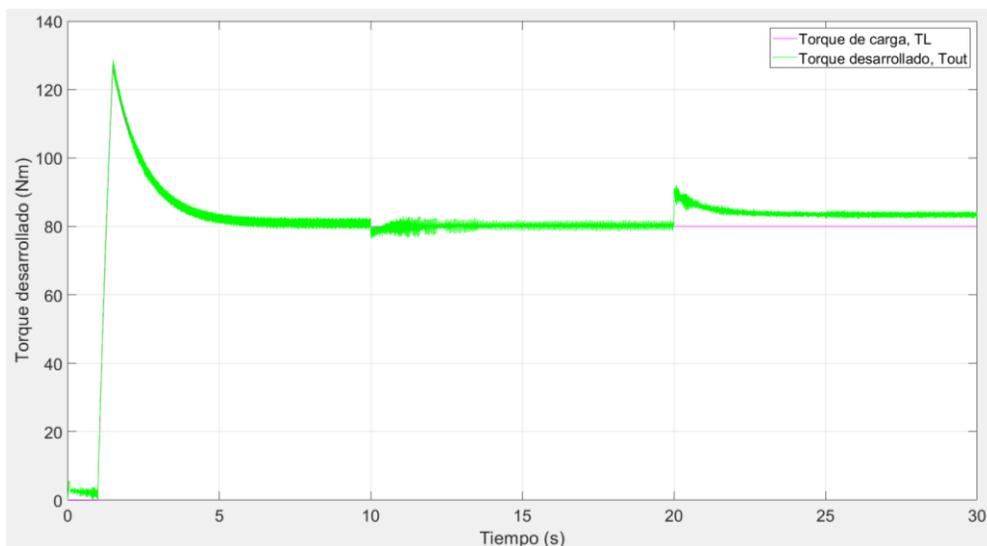


Figura 4.31: Par de carga y par desarrollado por el motor CA de 5 hp. Generada con MATLAB®.

Por otro lado, las corrientes medidas y las que vienen de los controladores dq convertidas al sistema ABC se muestran en la figura 4.33. Al igual que para el motor CA de 10 hp, la amplitud de las corrientes no se ve tan influenciada por los cambios de velocidad, pero sí afectan su frecuencia, de manera que, a mayor velocidad, mayor frecuencia. Asimismo, se puede observar un leve cambio en la amplitud, en $t = 1$ segundo, que es el momento en el que se acopla la carga al motor. Asimismo, se observa que los valores deseados y los medidos

se superponen, lo que indica que los controladores de corriente cumplen su función de manera adecuada.

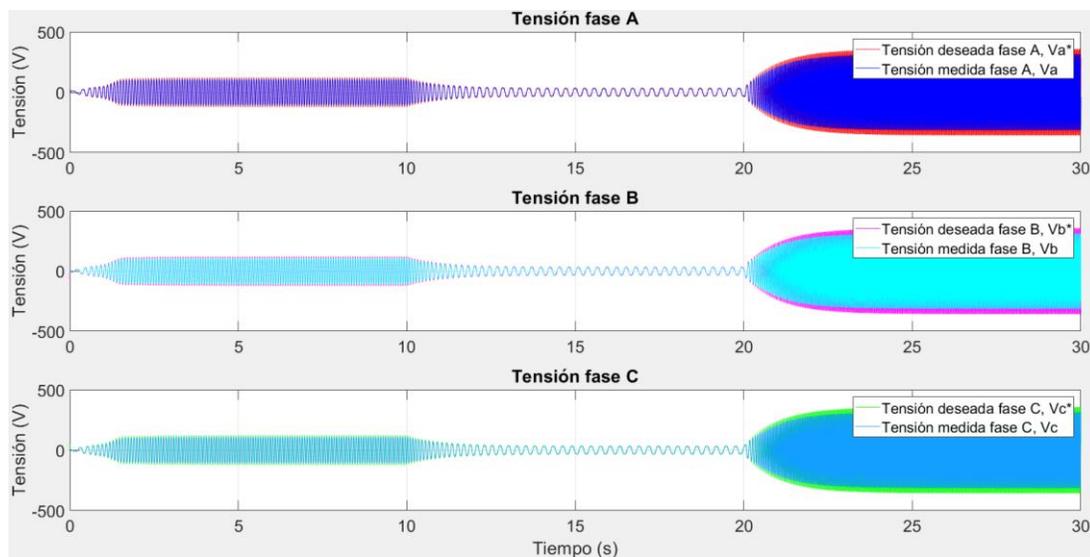


Figura 4.32: Tensiones ABC para el motor CA de 5 hp. Valores deseados y medidos. Generadas con MATLAB®.

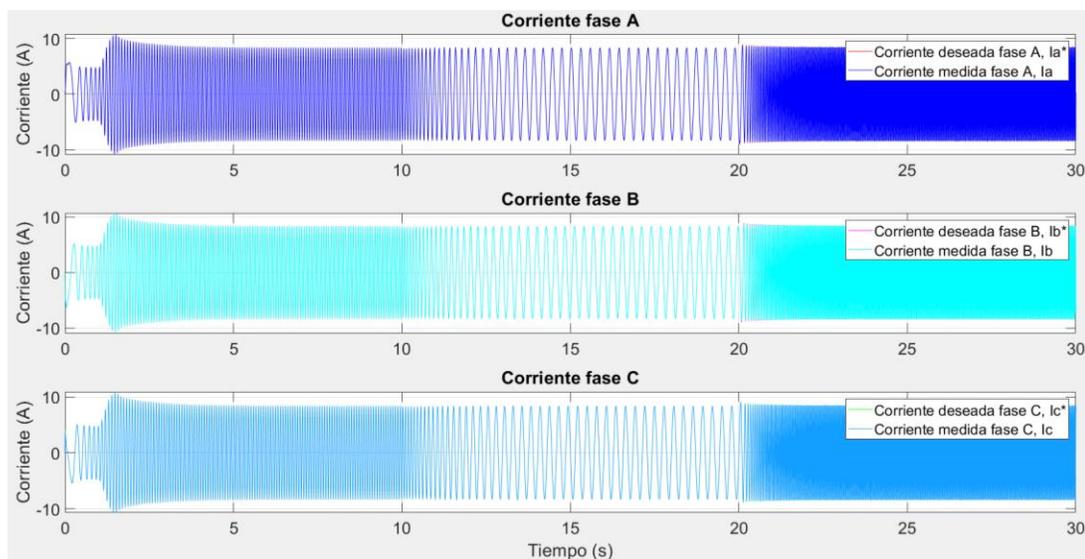


Figura 4.33: Corrientes de estator para el motor CA de 5 hp. Valores deseados y medidos. Generados con MATLAB®.

Ahora se analizan los variables en el sistema dq . Primero se analiza la corriente de eje directo. El valor deseado, como se mencionó, es constante y equivale a la corriente que muestra el motor al operar en vacío. Este valor se muestra en la figura 4.34, como una línea de

color roja, mientras que, superpuesta a dicha línea, se muestra la corriente de eje directo medida desde el motor, convirtiendo las corrientes ABC al sistema dq , de color verde. Al igual que sucede con la curva de torque, la curva de corriente de eje directo medida también muestra mucho ruido, debido a la frecuencia de muestreo utilizada. Sin embargo, se observa que el controlador sigue bastante bien el valor de referencia establecido.

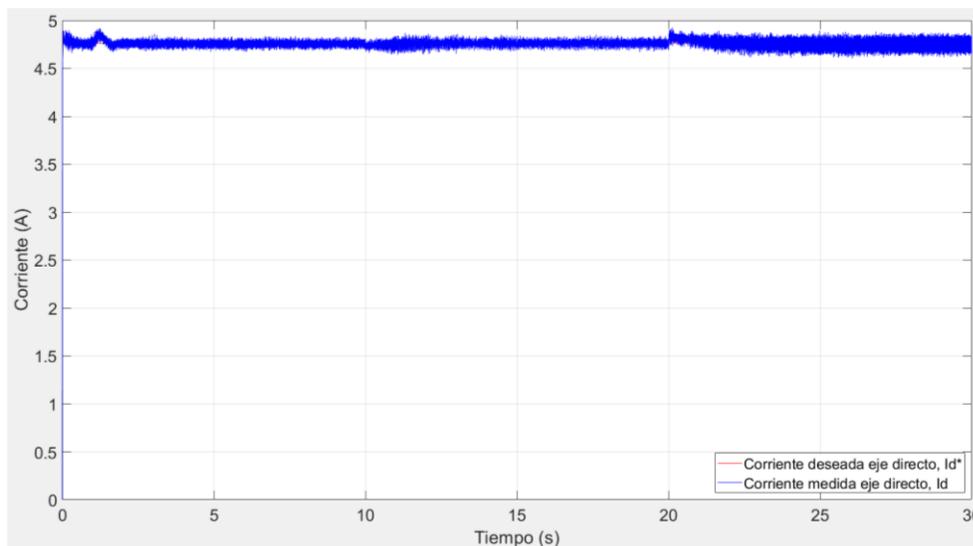


Figura 4.34: Corriente de eje directo medida para el motor CA de 5 hp y su valor deseado. Generadas con MATLAB®.

Luego se analiza la corriente de eje de cuadratura, la cual se muestra en la figura 4.35. Se observa tanto el valor deseado, que viene dado por la salida del controlador de velocidad, dado que se sigue el esquema de control en cascada, como el valor medido, obtenido de las corrientes ABC que se convierten al sistema dq y se retroalimentan a los controladores. Para este caso también se observa que la señal no es muy lisa pero sí tiende a seguir la consigna de corriente que viene impuesta por el controlador de velocidad.

Finalmente, se tienen los valores deseados de las tensiones de eje directo y cuadratura, los cuales se muestran en la figura 4.36. Al igual que en el caso del motor CA de 10 hp, se observa que estos valores varían de acuerdo con la consigna de corriente y el par de carga requeridos por la máquina, especialmente la tensión del eje de cuadratura, ya que la corriente de cuadratura es la que principalmente se ve influenciada por los cambios de velocidad y el par de carga, debido al desacople de las corrientes que implica la metodología de control vectorial indirecto.

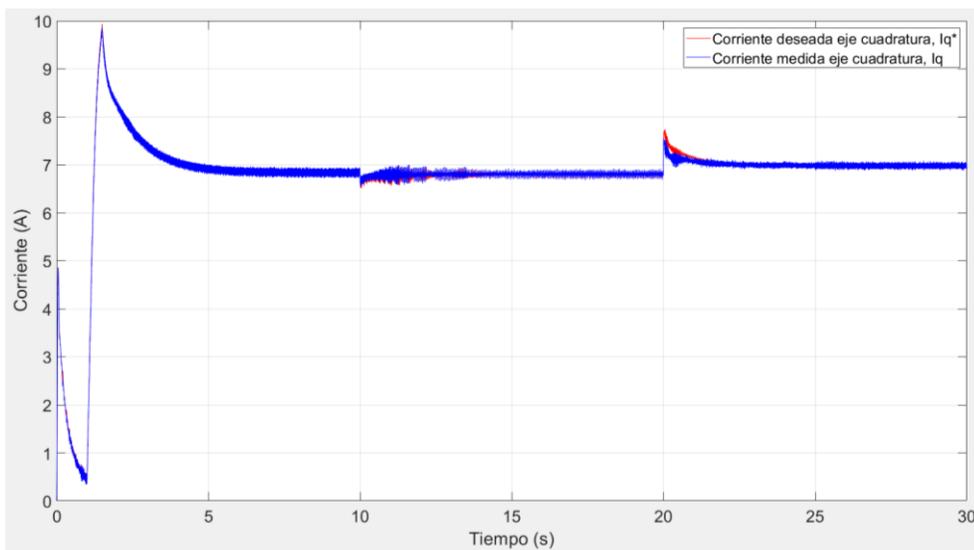


Figura 4.35: Corriente de eje cuadratura para el motor CA de 5 hp. Valores deseado y medido. Generados con MATLAB®.

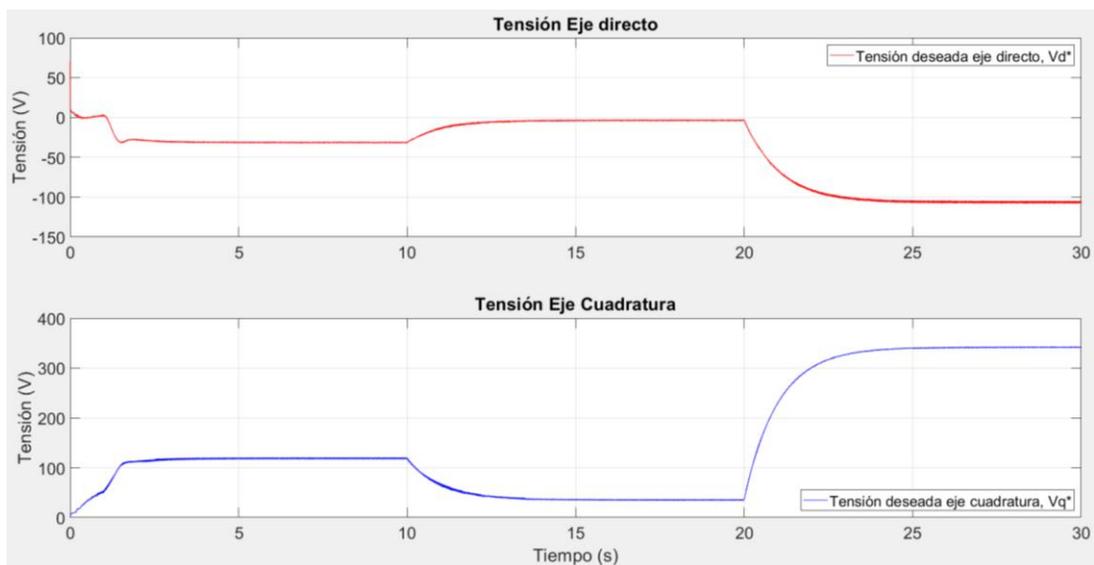


Figura 4.36: Tensiones de los ejes directo y cuadratura. Salidas de los controladores de corrientes dq. Generadas con MATLAB®.

4.2.2.2 Control del motor por control V/Hz sensorless

De igual manera, como se hizo con el motor CA de 10 hp, a este motor también se le aplicó la estrategia de control V/Hz. El montaje utilizado para este motor fue el mismo que se mostró en el apéndice AP.13, cambiando el bloque del motor por el correspondiente de 5 hp. Para este motor y este tipo de control, también se hizo la simulación en un lapso de 30 segundos con una frecuencia de muestreo de 1 MHz, y se midieron las mismas variables que para el caso del motor CA de 10 hp.

Analizando las variables mecánicas, se comienza por la velocidad. La curva obtenida al final de la simulación se muestra en la figura 4.37. Para este motor, se observa que el control es exitoso, en el sentido de que la velocidad que entrega el motor es cercana al valor deseado que viene impuesto por la consigna de frecuencia. Sin embargo, de manera cualitativa, se observa que la curva azul, que es la velocidad medida está relativamente más abajo que para el caso del motor anterior, lo que implica que este motor tiene un error en estado estacionario ligeramente superior con este esquema de control.

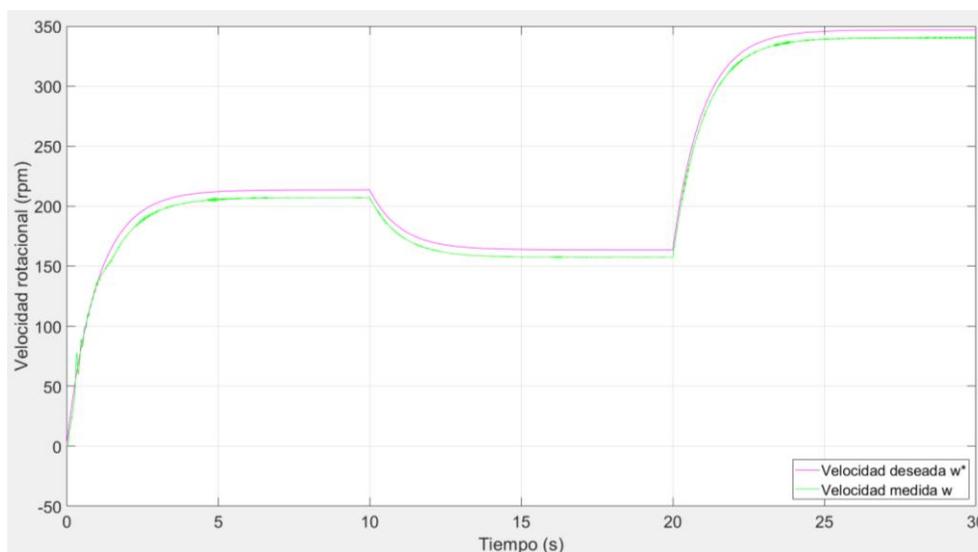


Figura 4.37: Velocidad rotacional medida y su valor deseado. Motor CA de 5 hp operando con control V/Hz. Generada con MATLAB®.

Seguidamente, también se muestra la gráfica del par de carga y el par que entrega el motor, en la figura 4.38. Para este caso, se observa que también la señal tiene su ruido, debido a la frecuencia de muestreo. A diferencia del motor de 10 hp con este tipo de control, este motor no presentó el pico de torque a la hora de acoplar la carga con el motor, además de la curva también se muestra bastante por encima de la curva roja, que es el par de carga que se aplica al motor.

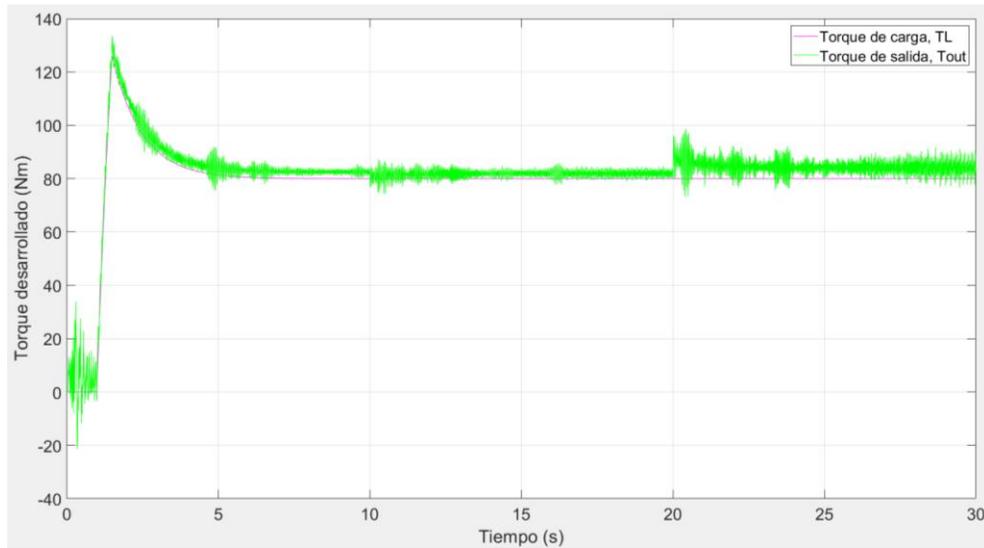


Figura 4.38: Par de carga y par desarrollado por el motor CA de 5 hp al operar con control V/Hz. Generada con MATLAB®.

Analizando ahora las variables eléctricas, se tiene en primer lugar las tensiones deseadas y las medidas a la salida del inversor. Las tensiones deseadas son la que pone el bloque de control V/Hz a su salida. Ambas tensiones se muestran en la figura 4.39. Al igual que para el motor anterior, para el motor operando con control vectorial indirecto, se observa que la tensión medida a la salida del inversor para cada fase es ligeramente menor a la tensión deseada de la fase correspondiente. Asimismo, para este caso también, la amplitud de la tensión varía con la consigna de la velocidad deseada.

Finalmente, se tienen las corrientes medidas en el estator del motor. Estas se muestran en la figura 4.40. Para este caso también, las formas de onda son bastante regulares, y no presentan los picos de corriente que tenían las corrientes de estator en el motor CA de 10 hp al momento de acoplar la carga al eje del motor, por lo que se puede decir que, al menos para lo que sería el torque, este motor operando con este esquema de control es un poco más apropiado, a diferencia del motor CA de 10 hp. Aparte de esa observación, las formas de onda son bastante similares comparadas con los resultados hasta ahora obtenidos, ya que, para el caso de las corrientes, estas no se ven afectadas en su amplitud, solamente en la frecuencia.

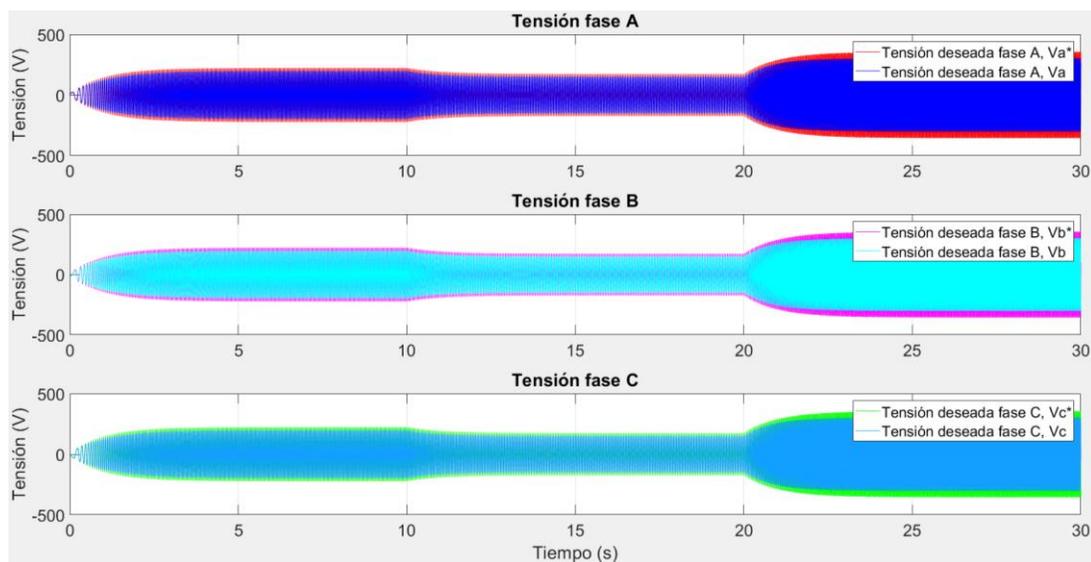


Figura 4.39: Tensiones deseadas y medidas para el motor CA de 5 hp operando con control V/Hz. Generadas con MATLAB®.

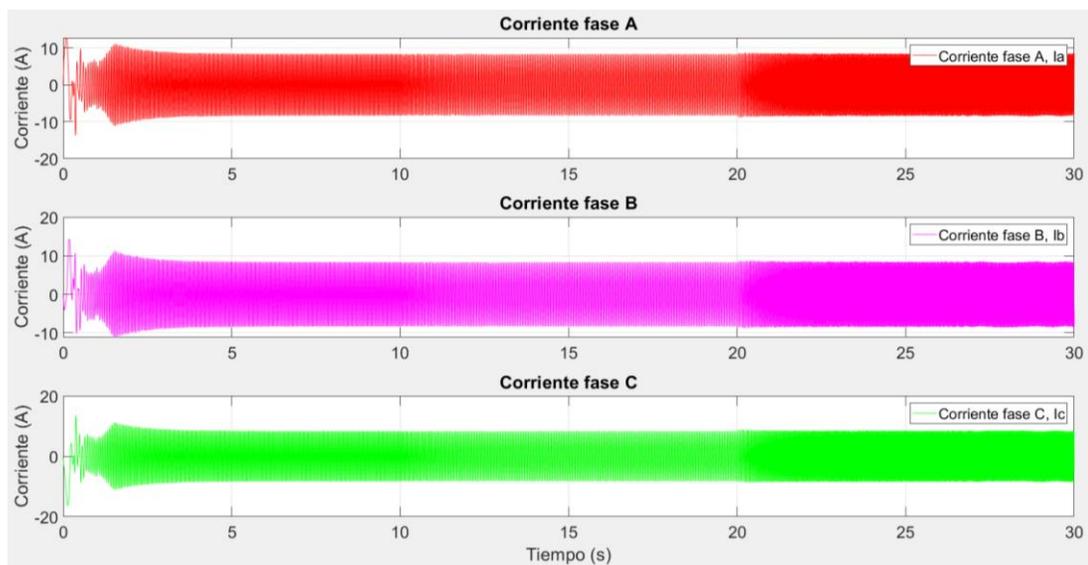


Figura 4.40: Corrientes de estator para el motor CA de 5 hp con control V/Hz. Generadas con MATLAB®.

4.2.3 Motor CA de 20 hp

Finalmente, el último motor que se evalúa, siguiendo la metodología propuesta, sería el motor de capacidad mayor. Para este caso, el motor de capacidad mayor disponible en la biblioteca de Simulink®, es el motor CA de 20 hp. Los datos de este motor se muestran en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Parámetros del motor CA de 20 hp

| Parámetro | Valor |
|---|----------|
| Potencia nominal (hp) | 20 |
| Velocidad nominal (rpm) | 1760 |
| Corriente nominal (A) | 24 |
| Tensión nominal (V) | 460 |
| Frecuencia nominal (Hz) | 60 |
| Eficiencia nominal (%) | 93 |
| Factor de potencia nominal (%) | 83 |
| Resistencia del estator (Ω) | 0.2761 |
| Inductancia de dispersión del estator (H) | 0.002191 |
| Resistencia del rotor (Ω) | 0.1645 |
| Inductancia de dispersión del rotor (H) | 0.002761 |
| Inductancia mutua (H) | 0.07614 |
| Inercia rotacional (kg m^2) | 0.1 |
| Coefficiente de fricción viscosa (Nm s) | 0.01771 |
| Pares de polos | 2 |

Al igual que los dos motores anteriores, para este también se realizaron las pruebas de eficiencia del estándar canadiense, utilizando el mismo montaje que se muestra en el apéndice AP.11 y cambiando el bloque del motor, con el fin de obtener la curva de eficiencia en función de la carga aplicada al motor, así como también las curvas de par velocidad y factor de potencia. Asimismo, para este motor también se graficaron en conjunto los datos de un motor real de ABB con el fin de compararlos y verificar que efectivamente, los valores obtenidos se asemejen a los que mostraría un motor real.

Una vez realizadas las pruebas, se obtiene la curva de eficiencia en función de la carga para este motor. Dicha curva se muestra en la figura 4.41. Para este caso también se ha marcado el punto en el cual se ubicaría la carga que representa la extrusora. Se observa que, cuando el motor opera a esta carga, opera con una eficiencia cercana al 80%, lo cual es relativamente menor a la eficiencia con la que operan los dos motores anteriores. Asimismo, se observa que los resultados obtenidos de aplicar las pruebas del estándar canadiense al modelo del motor de MATLAB® son muy cercanos a los resultados obtenidos para el motor de ABB, lo cual hace que los resultados tengan validez.

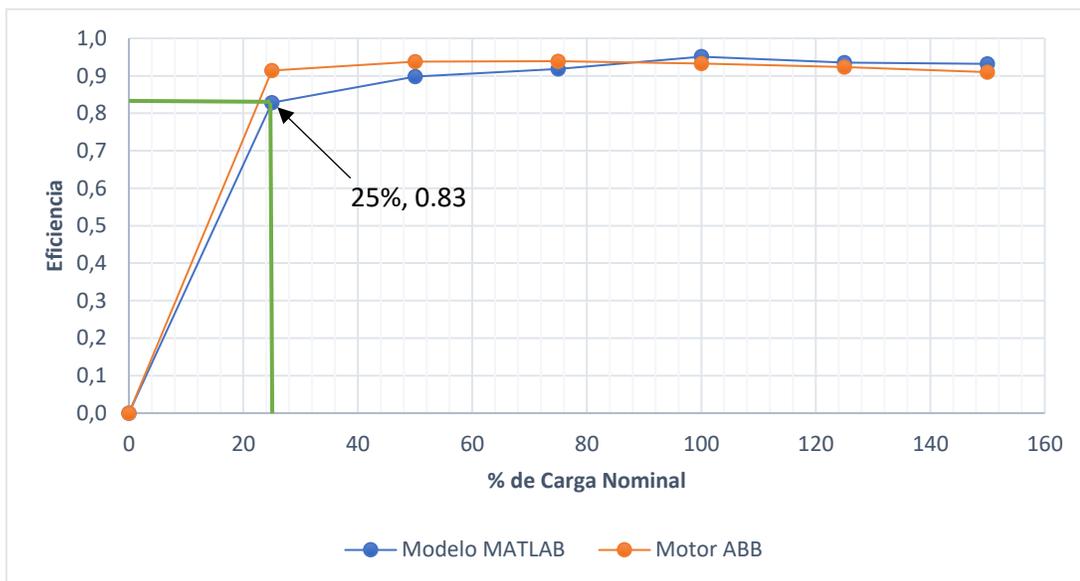


Figura 4.41: Curva de eficiencia en función de la carga nominal para motor CA de 20 hp. Generada con Excel.

Seguidamente, en la figura 4.42, se muestra la curva par velocidad obtenida para este motor. Aquí también se ha marcado la característica par velocidad de la extrusora y se observa que, para este caso, el motor operaría a una velocidad cercana a los 1792 rpm (equivalente a 448 rpm del lado de la extrusora), lo cual es bastante cercano al valor del motor CC.

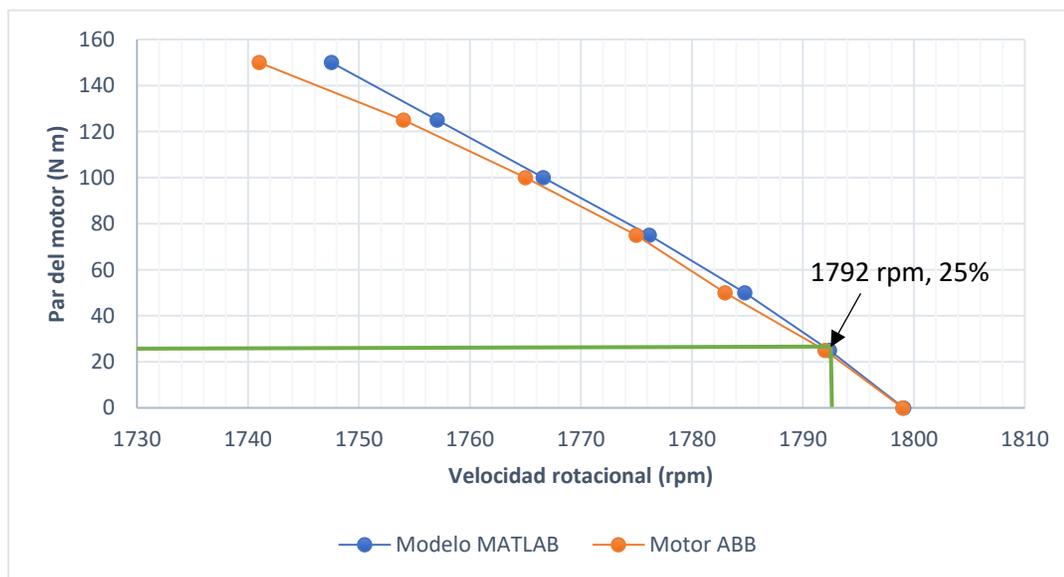


Figura 4.42: Curva par velocidad para motor CA de 20 hp. Generada con Excel.

A partir de los resultados obtenidos en estas pruebas, también se puede graficar también el factor de potencia en función de la carga aplicada al motor. Para este motor, se observa que, cuando opera la extrusora, se observa que el motor opera con un factor de potencia de aproximadamente 0.57, lo cual sí está un poco por debajo de los factores de potencia de los dos motores anteriores. Esto se muestra en la figura 4.43.

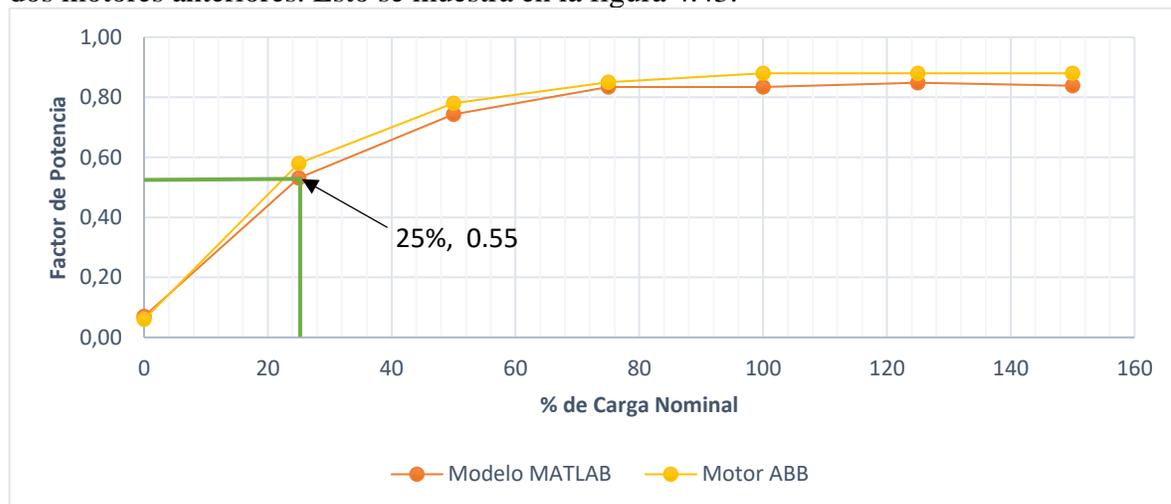


Figura 4.43: Curva factor de potencia para motor CA de 20 hp en función de la carga aplicada. Generada con Excel.

Asimismo, al igual que para los motores anteriores, también se graficó la característica de corriente con respecto al par aplicado al motor. Dicha curva se muestra en la figura 4.44. Al igual que las anteriores, también exhibe un comportamiento de función no lineal, y también se marcó el valor de corriente para el cual opera si se le conectara la extrusora. Para el caso de este motor, se observa que dicho valor de corriente, corresponde a aproximadamente 11 A, lo cual es bastante cercano al valor de corriente que ya utiliza el motor CC actual, y es ligeramente mayor a los valores reportados por los motores CA anteriores.

Finalmente, para este motor también se realiza el modelado térmico. Al igual que en los casos anteriores, se utilizaron datos del motor de ABB para complementar los parámetros de la ecuación (21). Al final, se obtiene la siguiente función de temperatura para este motor:

$$T(t) = 25 + 35.4724 \left(1 + e^{-t/8604.4} \right) \quad (62)$$

Esta función se grafica con MATLAB®, en un intervalo de tiempo de 15 horas (54000 segundos), y la curva obtenida se muestra en la figura 4.45. A partir de la curva, se observa que la temperatura que alcanzaría el motor en el estacionario sería de aproximadamente 61 °C, lo cual es bastante cercana a la temperatura que también alcanza al motor CC en el estado estacionario.

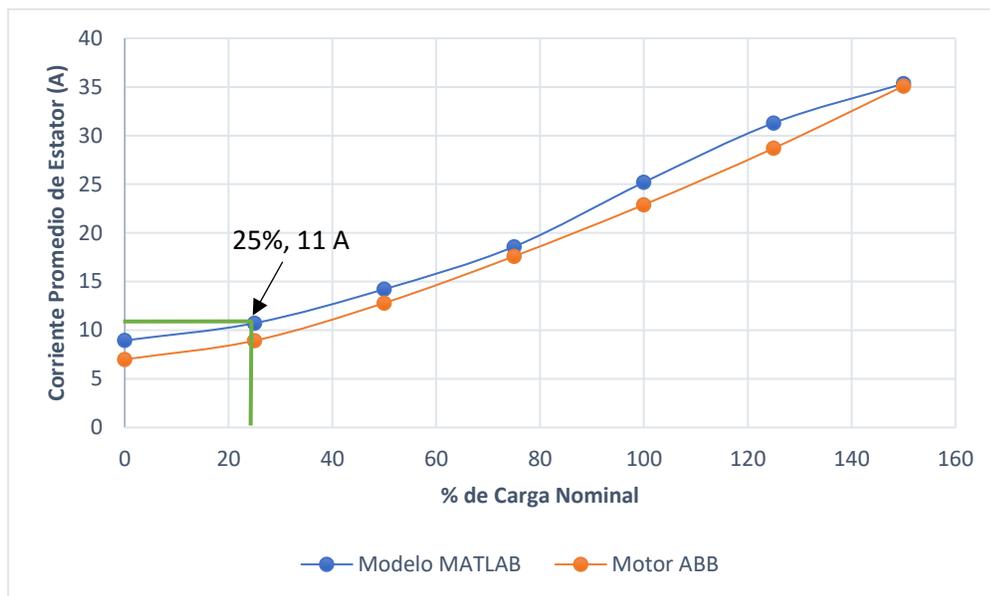


Figura 4.44: Curva de corriente de estator como función de la carga aplicada al motor CA de 20 hp. Generada con Excel.

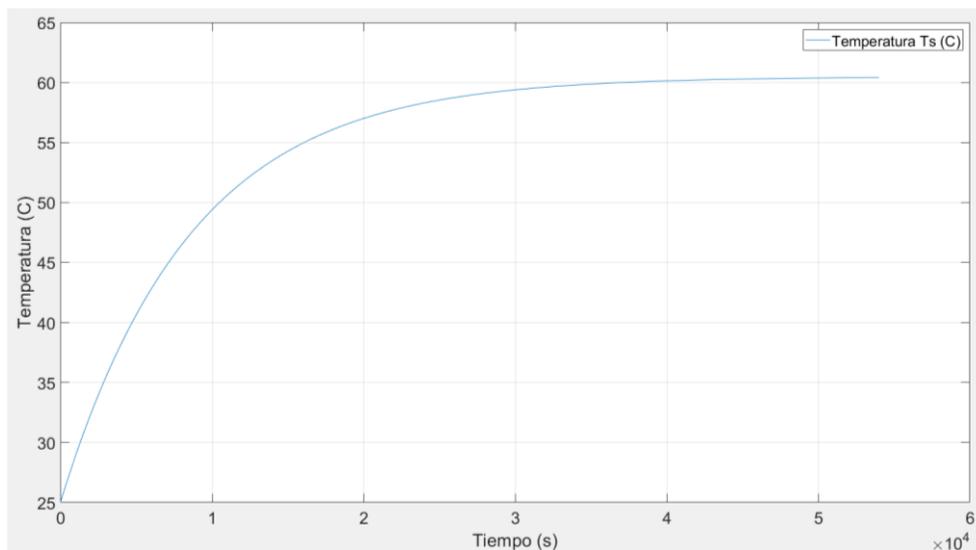


Figura 4.45: Curva de temperatura del motor CA de 20 hp con respecto al tiempo. Generada con MATLAB®.

Al igual que para los otros dos motores, también se realizaron las pruebas de control correspondientes. A este motor también se le aplicaron las estrategias de control vectorial indirecto con encoder y control V/Hz sensorless. Ambas simulaciones se realizan por un lapso de 30 segundos, con tres cambios en la consigna de velocidad, y se utiliza una

frecuencia de muestreo de 1 MHz. Para ambos casos, se miden las mismas variables que para los motores CA anteriores.

4.2.3.1 Control del motor por control vectorial indirecto con encoder

Primero se aplica el control vectorial indirecto con encoder al motor CA de 20 hp. El montaje utilizado para esta prueba fue el mismo que se mostró en el apéndice AP.12 cambiando el bloque del motor y resintonizando los controladores de las corrientes y la velocidad. Para el caso de este motor, la frecuencia de conmutación de los transistores se bajó a 1 kHz.

Para los controladores de corrientes, la función de transferencia, habiendo sustituido los valores numéricos de los parámetros del motor en la ecuación (49) da como resultado la siguiente función:

$$P_e(s) = \frac{1}{0.2761 + 0.004322s} \quad (63)$$

Al igual que los motores anteriores, aquí también se aplicó la sintonización de controladores mediante el LGR. Al insertar la función de transferencia de (63) en la herramienta *rltool* de MATLAB®, se obtuvo que $K_p = 5.5 \Omega$ y $T_i = 125.7 s$. Estos parámetros se ponen en los controladores de las corrientes de ejes directo y cuadratura. La saturación de estos controladores también se fijó en $\pm 376 V$.

Luego de sintonizar los controladores de las corrientes, se sintoniza el controlador de velocidad. Aquí también se sustituyeron los parámetros del motor CA de 20 hp en la ecuación (52) y se obtuvo la siguiente función de transferencia:

$$P_m(s) = \frac{1.2592}{0.01771 + 0.1s} \quad (64)$$

La ecuación (64) es la que se utiliza con el *rltool* para sintonizar el controlador. Al final se obtuvo $K_p = 9.9136 As/rad$ y $T_i = 125.8 s$. La saturación de este controlador se fijó en $\pm 16 A$. Con los controladores sintonizados, se realizan las pruebas y se miden las variables eléctricas y mecánicas de interés. Al igual que los motores anteriores, se empiezan por las mecánicas y luego se pasa a las eléctricas.

Se evalúa primero la velocidad rotacional. En la figura 4.46 se muestra la velocidad rotacional medida en color azul, y la consigna de velocidad rotacional en color rojo. Claramente se observa que la curva verde se superpone a la magenta, lo que indica que el controlador de velocidad está cumpliendo su función de manera adecuada.

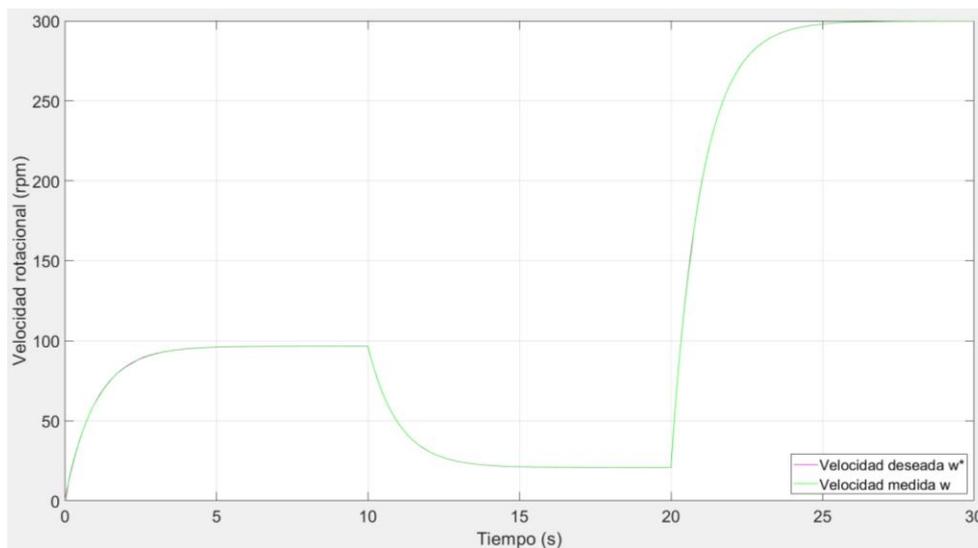


Figura 4.46: Velocidad rotacional medida y consigna de velocidad para el motor CA de 20 hp. Generada con MATLAB®.

Luego, se grafica el par desarrollado y el par de la carga aplicada al motor, ambos en la figura 4.47. Se observa que para este motor el par desarrollado presenta bastante ruido, que en los motores CA anteriores, aunque, solo de manera cualitativa, se podría decir que el torque desarrollado presenta más ruido, comparada con las señales de torque de los motores CA anteriores.

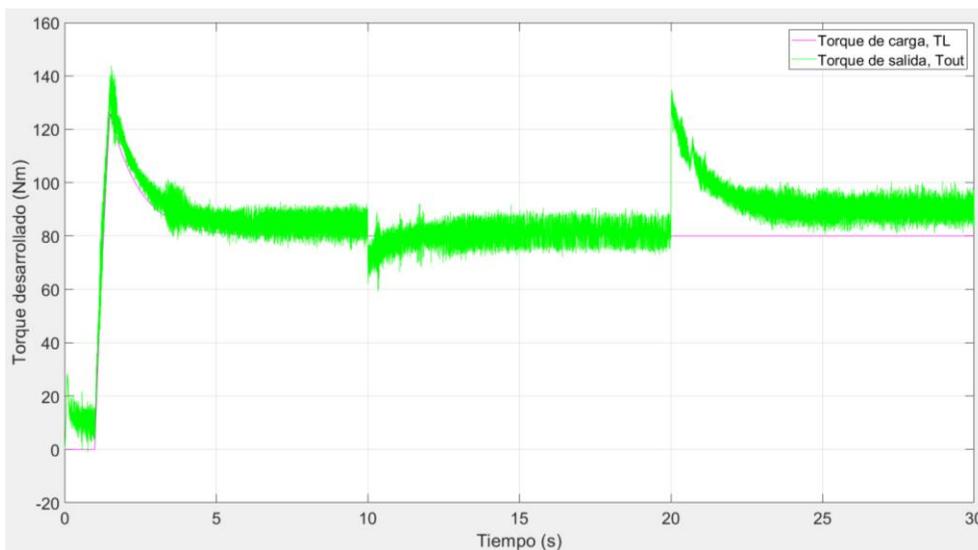


Figura 4.47: Par desarrollado por el motor CA de 20 hp y par de carga aplicado al motor. Generados con MATLAB®.

Luego, se analizan las variables eléctricas. En la figura 4.48 se grafican tanto los valores deseados, que son las salidas de los controladores dq convertidas al sistema ABC , y las salidas del inversor. Asimismo, en los primeros 20 segundos de la simulación, la tensión que entrega el inversor tiende a ser menor que la tensión de salida de los controladores, efecto que también sucede con los motores CA anteriores, pero para el caso de este motor, estas tensiones son muchos menores, al punto que las formas de onda de las tensiones provenientes de los controladores son más notables.

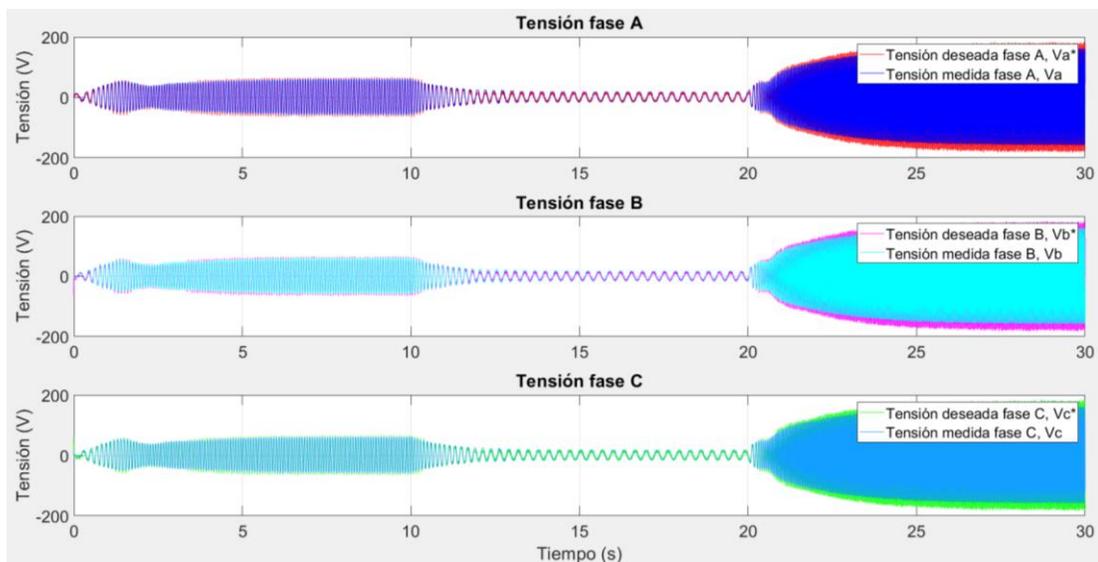


Figura 4.48: Tensiones ABC medidas a la salida del inversor y sus correspondientes valores deseados. Generadas con MATLAB®.

Luego se tienen las corrientes del motor en el sistema ABC . Los valores deseados de dichas corrientes, y los valores que se miden en el estator de la máquina se muestran en la figura 4.49. Para este motor, se grafican también las corrientes deseadas, que son las corrientes dq transformadas al sistema ABC .

Al observar la figura, se observa que tanto los valores deseados como los medidos están superpuestos, lo que indica que los controladores siguen de manera bastante adecuada las referencias de corrientes impuestas tanto para corriente de eje directo como para corriente de eje de cuadratura, convertidas al sistema ABC .

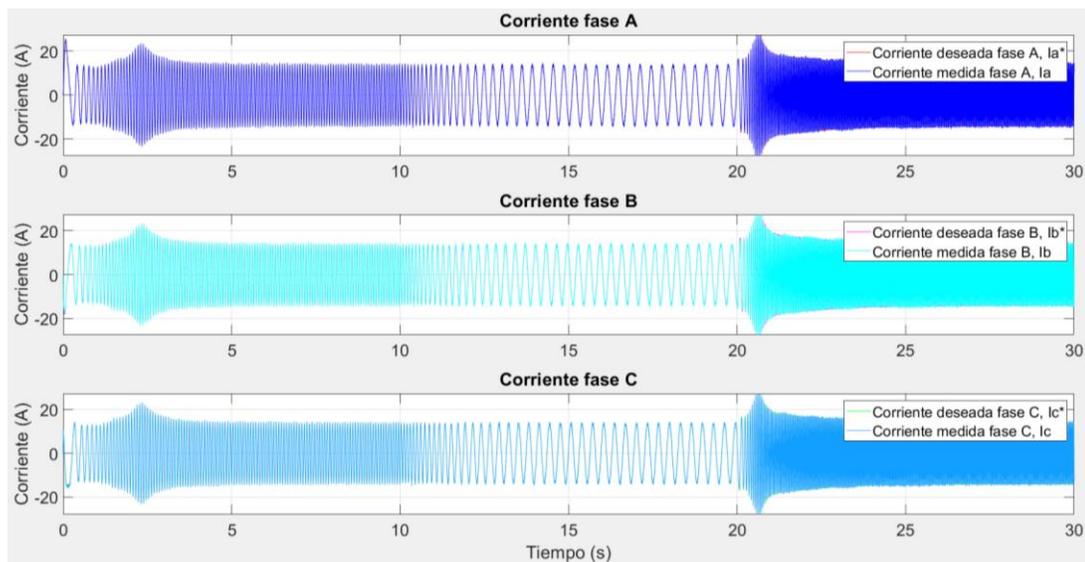


Figura 4.49: Corrientes del sistema ABC para el motor CA de 20 hp. Valores deseados y medidos. Generadas con MATLAB®.

Ahora se pasa a las variables en el sistema dq . Se comienza por la corriente de eje directo. Su valor medido y su valor deseado se muestran en la figura 4.50. Se observa que, para este motor, al igual que para la gráfica de torque, la corriente de eje directo medida presenta demasiado ruido, al punto que la curva se ve más como una barra de color verde cuya forma no es completamente simétrica, y cubre por completo la línea roja que representa la consigna de corriente de eje directo, que para este motor tiene un valor de 12.76 A.

Luego se muestra la corriente de eje de cuadratura, tanto su valor deseado como su valor medido, en la figura 4.51. Al igual que la corriente del eje directo, esta también presenta bastante ruido, ya que su resolución no es la óptima por la frecuencia de muestreo utilizada. A pesar de esto, se observa que el valor medido sigue el valor deseado, proveniente del controlador de velocidad, por lo que, si la simulación se hubiera realizado con una frecuencia de muestreo mayor, es muy probable que la gráfica se vería únicamente como una línea recta superpuesta a la referencia de corriente de cuadratura.

Y finalmente, para este motor operando con este esquema de control, se tienen los valores deseados de las tensiones de los ejes directo y cuadratura. Estas se muestran en la figura 4.52. Se observa que también estas señales salen con demasiado ruido, lo que hace que se vean poco claras. Sin embargo, al menos para la tensión del eje de cuadratura se observa que tiene un comportamiento casi similar a los obtenidos con los otros dos motores, lo que demuestra que esta tensión varía de forma directamente proporcional a la velocidad requerida por el motor.

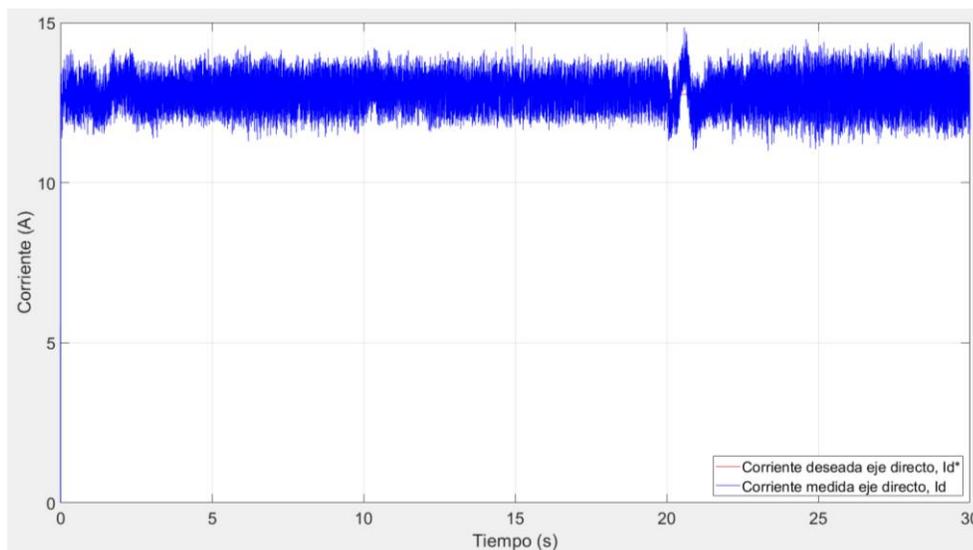


Figura 4.50: Corriente eje directo, valores deseado y medido, motor CA de 20 hp. Generada con MATLAB®.

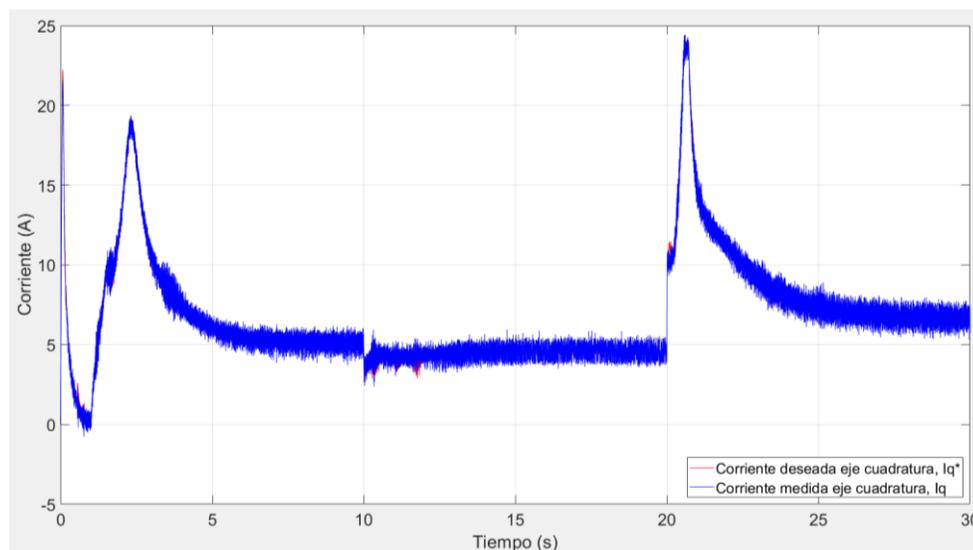


Figura 4.51: Corriente de eje de cuadratura para el motor CA de 20 hp. Valores deseado y medido. Generada con MATLAB®.

4.2.3.2 Control del motor por control V/Hz sensorless

Ahora se evalúan los resultados obtenidos para el motor CA de 20 hp cuando opera a lazo abierto, con el control V/Hz sensorless. El montaje para este motor también fue el mismo que se utilizó para el motor CA de 10 hp, mostrado en el apéndice AP.13, claramente cambiando el bloque del motor, y se midieron las mismas variables eléctricas y mecánicas.

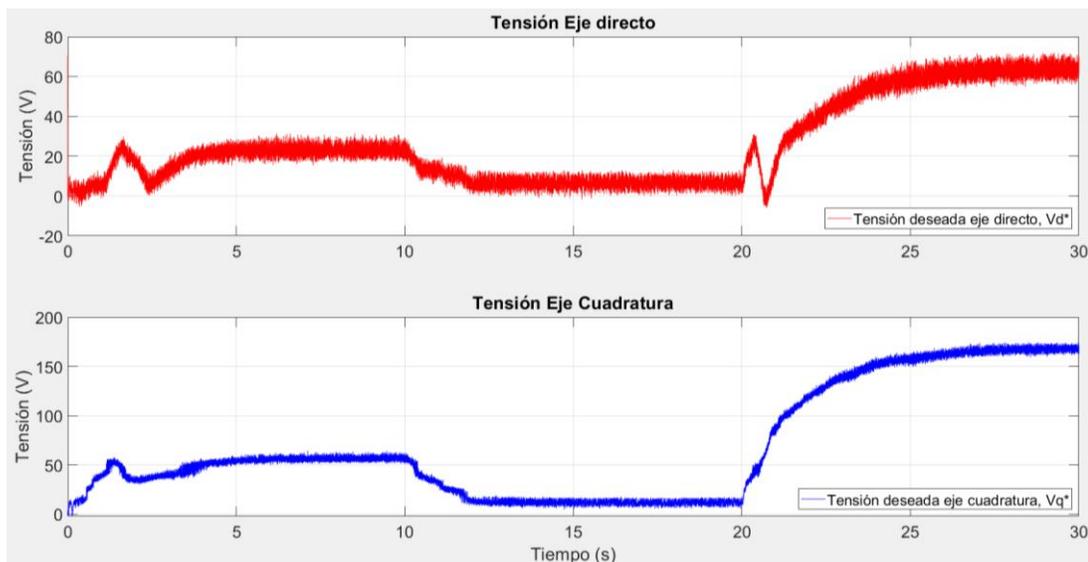


Figura 4.52: Tensiones deseadas de los ejes directo y cuadratura para el motor CA de 20 hp. Generadas con MATLAB®.

En la figura 4.53 se observa la velocidad rotacional medida y su correspondiente valor deseado para este motor. Se observa que hay un intervalo, entre los 3 y los 13 segundos, en el que la velocidad adquiere un comportamiento anómalo, en el sentido de que oscila demasiado y luego se estabiliza. Este error no se observó en los motores CA anteriores, a pesar de que se utilizó el mismo montaje, por lo que este podría ser un indicador de que este motor no debería operar con este esquema de control, al menos para esta aplicación en específico.

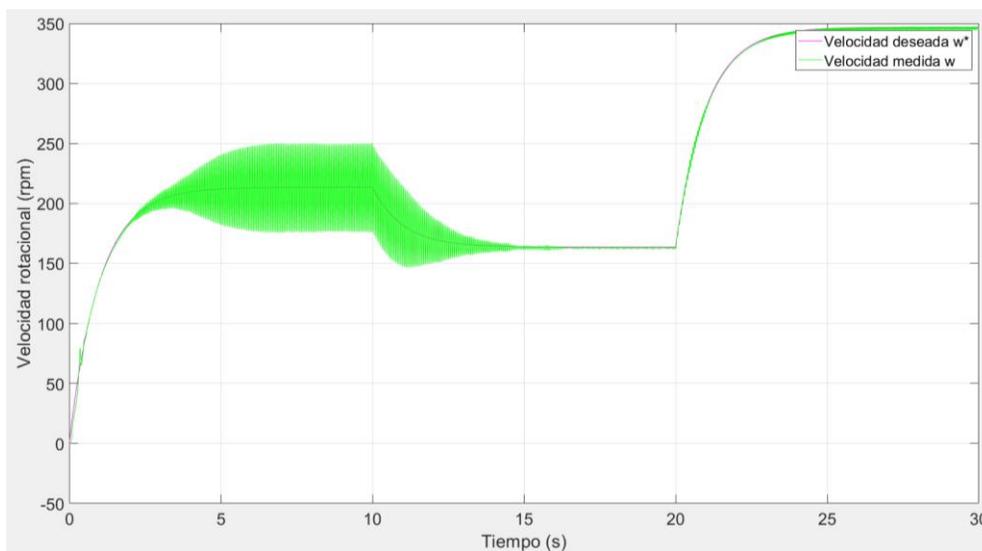


Figura 4.53: Velocidad rotacional medida para el motor CA de 20 hp con control V/Hz, y su valor deseado. Generada con MATLAB®.

Luego se muestra también el par desarrollado por la máquina, así como el valor de par que representa la carga, ambos en la figura 4.54. En esta figura se observa que el comportamiento anómalo que ocurrió en la velocidad también repercutió en el par que entrega la máquina, al punto que se observan oscilaciones en el torque, con picos que llegan casi hasta los 200 N m, por lo que claramente este motor no puede operar esta carga utilizando este esquema de control. Aun cuando con el control vectorial indirecto, la gráfica presentaba demasiado ruido, no se daban estas oscilaciones, por lo que, al menos para este motor y esta carga en particular, que sería la extrusora, la mejor opción sería utilizar únicamente control vectorial indirecto con encoder.

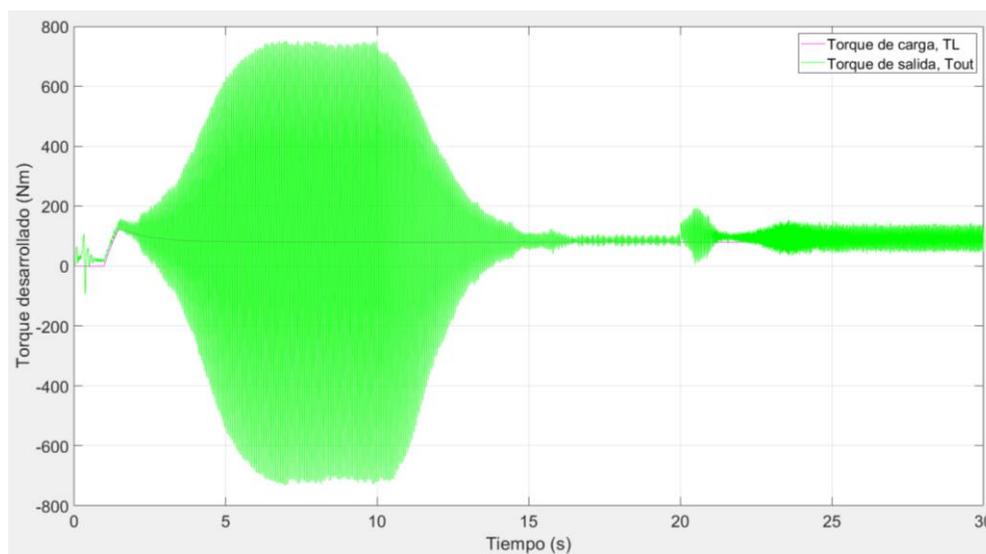


Figura 4.54: Par desarrollado por el motor CA de 20 hp al operar con control V/Hz y el par de carga aplicado al motor. Generados con MATLAB®.

Ahora se revisan los resultados obtenidos para las variables eléctricas. Las tensiones deseadas y medidas para este motor se muestran en la figura 4.55. Se observa que, a diferencia cuando el motor opera con control vectorial indirecto, las tensiones medidas a la salida del inversor no son tan pequeñas, comparadas con los valores deseados, provenientes del bloque de control V/Hz.

Y para el caso de las corrientes de estator, estas se muestran en la figura 4.56. Se puede ver que las oscilaciones del torque también se reflejaron en las corrientes, lo que distorsiona las formas de onda resultantes. Exceptuando ese hecho, el comportamiento durante el resto de la simulación se podría considerar como adecuado, ya que las corrientes se mantienen dentro de los 20 A de amplitud. Sin embargo, los picos de corriente creados durante el comportamiento anómalo alcanzan casi los 80 A, lo cual podría ser perjudicial tanto para la máquina como para el variador, en el caso de un motor y un variador real, reduciendo su vida útil o incluso provocando un daño irreversible.

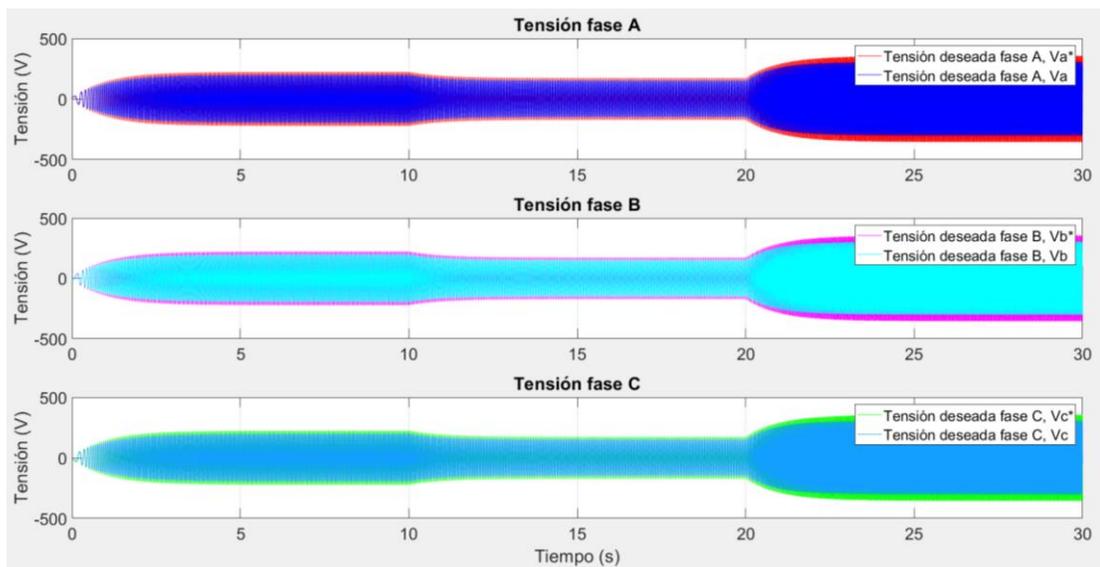


Figura 4.55: Tensiones deseadas y medidas para el motor CA de 20 hp al operar con control V/Hz. Generadas con MATLAB®.

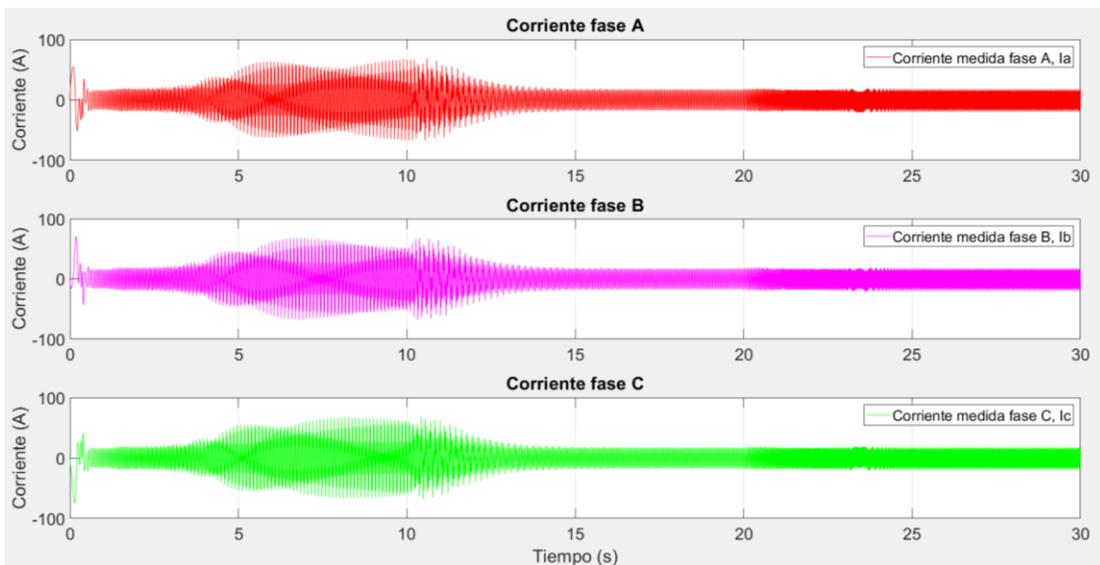


Figura 4.56: Corrientes de estator medidas para el motor CA de 20 hp operando con control V/Hz. Generadas con MATLAB®.

CAPÍTULO 5: Análisis de resultados y validación de la propuesta metodológica

En el capítulo anterior se expuso la metodología propuesta para poder realizar el reemplazo de la máquina CC por la máquina CA que mejor refleje el comportamiento de la máquina CC existente. Se mostraron también los resultados obtenidos de las pruebas de desempeño realizadas a las máquinas, sus curvas par velocidad y comportamiento. También se mostraron los resultados obtenidos con las simulaciones de control, de tal manera que se pudiera observar el comportamiento que tendría cada motor CA cuando estuviera operando la carga, que es la extrusora.

Ahora que se han mostrado todos estos resultados, este capítulo se centra en un análisis más detallado de estos, realizando comparaciones de los resultados obtenidos por cada motor CA entre sí, y con respecto al motor CC. Los análisis presentados en este capítulo se dividen en dos categorías, que se abordan en una sección independiente cada una.

La primera abarca los resultados de desempeño como tal (eficiencia, característica par velocidad y factor de potencia), así como también la característica térmica de cada motor. La segunda abarca un análisis de los resultados de control, comparando los resultados obtenidos por cada motor CA candidato con respecto a los otros dos y con respecto al motor CC. Al final, se presenta una sección de análisis final, en la cual se resumen los análisis realizados y se determina si la metodología propuesta se cumplió a cabalidad.

5.1 Análisis de los resultados de desempeño y temperatura

Los resultados de desempeño comprenden principalmente la eficiencia con la cual opera cada motor al controlar la carga, la velocidad aproximada obtenida de las curvas par velocidad, el factor de potencia para los motores de CA, y la temperatura en el estado estacionario que alcanza cada motor. Estos datos se resumen en la tabla 5.1. Estas pruebas conducen a resultados numéricos, los cuales, desde un punto de vista ingenieril, son los datos más adecuados para su análisis, ya que son datos exactos y no se trabaja desde una perspectiva cualitativa, sino más bien cuantitativa, comparando cantidades.

La primera fila muestra la eficiencia con la cual opera cada motor al manejar la carga, que en este caso son los 20 N m de la extrusora. Los tres motores CA tienen eficiencias bastante altas, aproximadamente el doble de la eficiencia con la que opera el motor CC actual. De los tres motores CA, el que operaría con la eficiencia más alta sería el motor de 10 hp, mientras que el motor de 20 hp presenta la eficiencia más baja al operar la extrusora.

Tabla 5.1: Resultados obtenidos para los motores durante las pruebas de desempeño y temperatura

| Parámetro | Motor CC | Motor CA 10 hp | Motor CA 5 hp | Motor CA 20 hp |
|---|----------|----------------|---------------|----------------|
| Eficiencia (%) | 45 | 92 | 90 | 83 |
| Factor de potencia | - | 0.75 | 0.81 | 0.55 |
| Velocidad al operar la extrusora (rpm) | 447 | 446 | 440 | 448 |
| Corriente (A) | 10 | 7 | 6.5 | 11 |
| Temperatura de estado estacionario (°C) | 95 | 83 | 109 | 61 |

Se podría decir entonces que la eficiencia no sería un factor de gran relevancia, ya que, si bien es cierto, es un dato de bastante importancia a la hora de un tema de energía, se observa claramente que cualesquiera de los 3 motores CA tienen una eficiencia mucho mayor a la que tiene el motor CC actual, por lo que, este factor sí se tomaría en cuenta, pero como no con gran peso.

La segunda fila muestra los factores de potencia de cada motor CA, ya que el motor CC no presenta este dato. El factor de potencia representa, desde un punto de vista teórico, el porcentaje de energía que se aprovecha para realizar trabajo mecánico en un circuito de corriente alterna. Se sabe que entre más cercano sea este valor a la unidad, la mayor parte de la energía se utiliza para generar potencia activa o utilizable, minimizando el uso de energía en potencia reactiva. Los motores se modelan como circuitos RL, por lo que la energía que se utiliza en reactivo se almacena en las inductancias de los bobinados, y el resto es lo que pasa a utilizarse para generar trabajo.

Para el caso de los 3 motores CA, se observa que el motor de 5 hp es el que tiene el factor de potencia más alto, de 81%, lo que indica que, del 100% de la energía suministrada al motor, 81% se utiliza para generar potencia activa que produce trabajo, mientras que solo un 19% se destina a la potencia reactiva que genera el campo electromagnético en el entrehierro de la máquina. Por el otro lado, el motor de 20 hp es el que presenta el factor de potencia más bajo, de apenas 55%, lo que implica que, en este motor, cerca de la energía suministrada para manejar la extrusora se está utilizando únicamente para generar el campo electromagnético, por lo que, se podría decir que una parte considerable de la energía no se está utilizando activamente. Finalmente, el motor de 10 hp tiene el factor de potencia más alto que el motor de 20 hp, y no tan lejano al del motor de 5 hp, por lo que, podría decirse que es como la opción del medio.

Con respecto a las velocidades, éstas se obtuvieron de las curvas par-velocidad, pero en la tabla 5.1 se muestran medidas del lado de la extrusora. Como se ha dicho, la velocidad del motor CC es conocida, puesto que es el sistema actual, por lo que este sería el valor de referencia, y las velocidades medidas para los motores CA serían los valores a comparar.

En el primer caso, del motor CA de 10 hp, su velocidad medida fue de 446, por lo que, con respecto al valor de referencia, hay una diferencia de 0.2237%, lo cual es un error bastante pequeño, apenas 0.2%, por lo que, en caso de que el control de velocidad fuera crítico, este motor sería una opción bastante adecuada.

El motor de 5 hp, mostró una velocidad de 440 rpm, lo que implica que existe un error de 1.566% comparado con el valor de referencia, lo cual es un error mucho mayor, si se comparan las velocidades en magnitud, y si se compara este porcentaje con el obtenido en el motor anterior. Y finalmente, el motor de 20 hp, mostró una velocidad de 448 rpm, el cual, comparado con el valor de referencia, el porcentaje de error para este caso fue de -0.2237%, igual en magnitud que el motor CA de 10 hp.

La cuarta fila muestra la corriente en magnitud que tendría cada motor al operar con un par que equivalente al par de la extrusora. Se observa que el motor CA de 5 hp presenta la menor de las corrientes, mientras que el motor de 20 hp presenta la mayor de las corrientes, incluso más alta que la corriente del motor CC actual, mientras que, por otro lado, el motor CA de 5 hp muestra la corriente más baja, por lo que, este motor muestra una eficiencia que es bastante alta, y consecuentemente, un factor de potencia bastante alto. El motor de 10 hp muestra un comportamiento medio entre los otros dos motores, ya que su corriente es ligeramente más alta que la del motor de 5 hp, pero menor que la del motor de 20 hp y que la del motor CC.

Por último, la última fila de la tabla 5.1 muestra las temperaturas máximas que alcanzaría cada motor cuando opera la extrusora. Como se pudo observar de las curvas de temperatura obtenidas para cada motor, ninguno de ellos llega a este valor con el tiempo de simulación utilizado. Sin embargo, si se toma la función de temperatura de cada uno de ellos y se hace el límite cuando t tiende a infinito, se obtienen estos valores.

Para el caso del motor CC, se observa que su temperatura en el estacionario es de aproximadamente 95 °C, lo cual es un incremento de temperatura bastante significativo para un motor, ya que, un calentamiento excesivo puede conllevar a un desgaste de los aislamientos térmicos, lo que puede limitar considerablemente la vida útil del motor.

Para los 3 motores CA candidatos, las temperaturas en el estacionario obtenidas fueron muy distintas. Empezando por el motor CA de 10 hp, su temperatura de estacionario es de aproximadamente 83 °C, lo cual es un poco inferior a la temperatura del motor CC. Su constante de tiempo térmica es más alta que la del motor CC, lo que indica que tarda más tiempo

en alcanzar dicha temperatura, pero aun así esta temperatura es casi un 40% superior a la temperatura final que alcanza el motor CC, por lo que ocuparía mucha más ventilación.

El motor de 5 hp es el que alcanza la temperatura de estacionario más alta, superior a los 100 °C, lo cual es más alto, por lo que este motor definitivamente ocuparía un aislamiento térmico en sus devanados más alto. Esta temperatura se podría decir que es producto de que el motor opera prácticamente al 100% de su par nominal, por lo que también debe estar entregando su corriente nominal, a diferencia de los otros dos motores, en los cuales la carga utilizada representa un el 50% del par nominal para el motor de 10 hp, y un 25% para el motor de 20 hp, por lo que estos motores entregan menos corriente, y, por lo tanto, es de esperar que su calentamiento no sea tan excesivo.

Finalmente, el motor de 20 hp es el que exhibe la temperatura de estacionario más baja. Como se mencionó anteriormente, este motor opera con una carga que representa aproximadamente el 25% de su par nominal, por lo que la corriente que requiere para operar dicha carga es bastante baja. Además de esto, su constante térmica es la más alta obtenida, por lo que también tardaría más que el motor CC en alcanzar su temperatura máxima.

En síntesis, dado todo lo anteriormente expuesto, y considerando que al tratarse de un proyecto que involucra control, y sobre todo control de velocidad, y tomando en consideración los otros aspectos de la tabla 5.1, se puede concluir que el motor CA más apropiado para reemplazar al motor CC actual sería el motor de 10 hp. Esto dado que, su eficiencia es más alta que la del motor CC actual y su factor de potencia es un valor medio entre los tres motores CA presentados; su error de velocidad obtenido para este motor es bastante bajo, y su temperatura de estacionario es más baja que la del motor CC.

5.2 Análisis de los resultados de las pruebas de control

Ahora que se analizaron los resultados de desempeño y temperatura, se procede a analizar los resultados de las pruebas de control. Como se mencionó en la metodología propuesta del capítulo 3, si es posible realizar simulaciones que muestren el comportamiento del motor CA al controlar la extrusora, estas se deben realizar, para tener un posible escenario de cómo sería este motor controlando la extrusora. Las pruebas son opcionales, ya que, para casos de las industrias reales, es incierto saber si cuentan con los recursos necesarios para conducir dichas pruebas. Este, por ser un trabajo de simulación, da la posibilidad de realizarlas, por lo que no se puede dejar pasar la oportunidad. De esta manera, se tendría una idea más clara de cómo trabajaría el motor seleccionado y si fuera necesario realizar algún ajuste o tomar alguna consideración adicional.

Empezando por el motor CC, este es el motor original, el cual se quiere reemplazar. Para este motor, las pruebas que se realizaron serían pruebas reales, pero su valor está en ver cómo se comporta este motor al controlar la extrusora, y comparar los resultados de las simulaciones de los motores CA con los de este motor, y entre sí también.

Para el caso del motor CC únicamente, se observa que el control de velocidad es bastante bueno, ya que, como se pudo observar en la figura 4.5, la consigna de velocidad y la velocidad que se mide a la salida del motor son la misma, por lo que el control de velocidad está muy bien diseñado. En cuanto al torque, en la figura 4.6, claramente se observa un *offset* entre el par de la carga y el par que suministra la máquina, debido al torque de fricción de Coulomb, y al coeficiente de fricción viscoso, que crea un torque de oposición proporcional a la velocidad, razón por la cual motor debe entregar más torque que el que requiere la carga.

El primer motor CA analizado fue el de 10 hp. Se implementaron dos metodologías de control para éste y los otros dos motores CA, y las simulaciones arrojaron sus respectivos resultados. Se analizan primero los obtenidos con el método de control vectorial indirecto. Para este caso, la velocidad medida fue también igual a la consigna de velocidad, tal como se pudo observar en la figura 4.14, por lo que, en este caso, al compararlo con el motor CC, el motor CA logra cumplir con las consignas de velocidad adecuadamente. Por otro lado, la gráfica de torque, mostrada en la figura 4.15, claramente muestra que el valor del torque está muy cercano al de la carga, por lo que se puede decir que este motor sigue la consigna de par muy apropiadamente, además de que este motor no tiene el torque de Coulomb, por lo que no hay error permanente.

Con respecto a las variables eléctricas, se analizan las variables en los ejes dq , ya que el punto de la metodología de control vectorial indirecto, es replicar el comportamiento de la máquina CC en la máquina CA. La corriente de eje directo se mantiene en un valor constante, y se observa, de la figura 4.18, que la curva verde está sobre la línea roja, lo que indica que el controlador de corriente de eje directo también está funcionando adecuadamente.

En cuanto a la corriente del eje de cuadratura, al igual que la corriente de armadura del motor CC, esta recibe sus consignas del controlador de velocidad, y se ajusta de acuerdo con el par requerido por la máquina. Como se pudo observar en la figura 4.19, la corriente del eje de cuadratura medida también se superpone a la consigna proveniente del controlador de velocidad, por lo que este controlador también está cumpliendo su función apropiadamente, y además de que también conserva su valor constante, determinado por el par de carga que se le está aplicando al motor.

Finalmente, las tensiones de los ejes directo y cuadratura se mostraron en la figura 4.20. Al igual que sucedía para la tensión de armadura en el caso del motor CC, la tensión del eje de cuadratura varía de acuerdo con la velocidad requerida por el motor, por lo que se observa que claramente, esta metodología de control replica de manera exitosa el comportamiento de la máquina CC.

Por otro lado, también se implementó el control V/Hz sensorless para este y los otros dos motores CA, como alternativa al control vectorial indirecto. Esta metodología no se basa en replicar el comportamiento de la máquina CC, sino en mantener el flujo de campo magnético en el entrehierro en un valor constante. Es un esquema de control bastante simple, y por lo general es el que más se implementa en las industrias, por lo que se consideró necesario replicarlo en este trabajo.

Para el caso del motor CA de 10 hp, la velocidad obtenida se muestra en la figura 4.21. Para este motor, claramente se observa que la velocidad medida tiende a tener ciertas imperfecciones en la curva, y además también presenta un pequeño error en el estado estacionario, lo cual es evidente ya que la curva verde no está superpuesta a la curva magenta. Esto viene a corroborar lo expuesto en el marco teórico, en la comparación de los métodos de control para motores eléctricos. En la tabla 2.2, el error de velocidad en el control V/Hz sensorless es cerca del 1%, mientras que el control vectorial indirecto presenta un error de 0.001%, lo cual es mil veces más preciso.

Con respecto al torque, en la figura 4.22, se muestra tanto el par de salida como el par de carga aplicada al motor, Se observa que la curva verde también se superpone a la magenta, aunque presenta una considerable cantidad de ruido. El detalle más notable de esta curva, son los picos de torque que exhibe el motor, especialmente cuando se aplica la carga. Esto no ocurrió con el control vectorial indirecto, pero esto se debe a que esta metodología de control no es tan robusta como el control vectorial, por lo que sería de esperarse este tipo de oscilaciones. Esto podría afectar seriamente los acoplamientos que se fuera a utilizar, o el eje del motor en sí, por lo que, en caso de que se fuera a utilizar esta metodología, sería bueno escoger un acople que presente buena resistencia ante variaciones bruscas del par de carga.

En cuanto a las variables eléctricas, las tensiones en el sistema *ABC* muestran un comportamiento similar a las obtenidas en caso del control vectorial indirecto (figura 4.23). En ambos casos, la amplitud de las tensiones se ajusta de acuerdo con la consigna de velocidad que se está siguiendo. Y también, las salidas de los controladores tienden a ser un poco más grandes que los valores que se están midiendo en la salida del inversor. Esto posiblemente se pueda deber al filtro utilizado, que debe estar recortando más componentes y por ende disminuye la amplitud.

En cuanto a las corrientes, para el caso del control V/Hz, no se tienen valores de corrientes deseadas, ya que solo se enfoca en la tensión. Sin embargo, se observa que, en ambos casos, la frecuencia de las señales se ajusta de acuerdo con la velocidad requerida, y las amplitudes tienden a conservar un valor estable. No obstante, al comparar la figura 4.17 del control vectorial indirecto, con la figura 4.24 del control V/Hz, se observa que el pico de torque generado al acoplar la carga en el segundo método de control también se observa en estas curvas, provocando picos de corriente de hasta 20 A, lo cual podría ser perjudicial para

los equipos, activar protecciones de manera inadecuada o reducir la vida útil del motor y el variador, por lo que es un contratiempo que se observa con esta metodología de control.

Ahora, pasando al motor CA de 5 hp, se implementan las dos metodologías de control y se analizan los resultados. Empezando por el control vectorial indirecto, en la figura 4.30, se observan tanto la velocidad deseada, como la medida. Claramente, aquí también el controlador sigue adecuadamente la consigna de velocidad, por lo que este no es mayor problema para este motor, el controlador está bien diseñado e implementado.

Con respecto al torque, este se muestra en la figura 4.31. De manera cualitativa, se observa que la curva verde tiene menos ruido que la obtenida para el motor CA de 10 hp, por lo que, al menos en esta variable, este motor presenta una mejora. Igualmente, si se lograra mejorar la resolución del sistema, se vería que ambos motores también proveen pares en sus ejes suficientes para cubrir el par de carga aplicado.

Pasando ahora en las variables eléctricas en el sistema dq . Las corrientes de los ejes directo y cuadratura, mostradas en las figuras 4.34 y 4.35 respectivamente, muestran un comportamiento similar al obtenido con el motor CA de 10 hp. La corriente de eje directo se mantiene en un valor constante, superpuesta al valor deseado de dicha corriente, mientras que la corriente del eje de cuadratura tiende a variar de acuerdo con la velocidad deseada, pero se mantiene en un valor estable para mantener el torque suministrado, por lo que, para estos dos controladores, también se puede decir que cumplen su función adecuadamente.

Las tensiones de eje directo y cuadratura se muestran en la figura 4.36. El comportamiento de las tensiones es bastante similar al obtenido para el motor CA de 10 hp, puesto que ambas tensiones, y sobre todo la tensión del eje de cuadratura tienden a variar, especialmente con los cambios de velocidad, lo cual sucede con la tensión de armadura en el motor CC.

Por otro lado, también se tienen los resultados del control V/Hz implementado para este motor. En la figura 4.37 se muestran la velocidad medida y la consigna de velocidad. Se observa que también, para este motor, existe un error permanente, ya que la curva verde tiende a estar por debajo de la magenta. Asimismo, también, la curva verde presenta algunas imperfecciones, a diferencia de la obtenida con el control vectorial indirecto, que es completamente lisa, lo cual viene a reforzar la idea de que, para esta aplicación, en la cual la velocidad es un aspecto bastante crítico, y el sistema CC actual presenta un control de velocidad bastante bueno, lo ideal es utilizar un esquema de control vectorial indirecto para el motor CA a utilizar de reemplazo.

Seguidamente, en la figura 4.38, se muestra el par desarrollado por el motor de 5 hp al utilizar control V/Hz, y el par de carga. Aquí también se muestran algunos picos de torque, al acoplar la carga al motor, lo cual, como se mencionó antes, podría ser perjudicial para el eje y los acoplamientos utilizados, ya que estos entonces tendrían que diseñarse considerando estas variaciones. Fuera de ahí, se observa que la curva verde cubre la curva magenta del par

de carga, y si la señal de torque tuviera mejor resolución, se vería que esta estaría plenamente por encima de la magenta, lo que implicaría que, al menos para el control de la carga, esta metodología de control no es tan mala.

Pasando ahora a las variables eléctricas, se tienen las tensiones en la figura 4.39. Aquí también se observa que las tensiones siguen los comportamientos mostrados para el motor CA de 10 hp, y para el motor CA de 5 hp con control vectorial indirecto, en el cual, las tensiones medidas son un poco más pequeñas que las deseadas, pero de nuevo, esto principalmente se pueda deber al filtro utilizado a la salida del inversor, que puede estar recortando componentes de frecuencia necesarias para el mostrar las tensiones adecuadamente.

Finalmente, se tiene el motor CA de 20 hp. En la sección anterior, se escogió este motor como el más adecuado para reemplazar al motor CC actual, debido a la característica par-velocidad y el comportamiento térmico. Ahora, se analizan los resultados de cómo se comportaría el motor al controlar la extrusora, Al igual que los motores CA anteriores, también se implementó tanto el control vectorial indirecto, como el control V/Hz.

Para el motor CA de 20 hp con control vectorial indirecto, la curva de velocidad medida y la consigna de velocidad, ambas en función del tiempo, se mostró en la figura 4.46, y se observa claramente que, al igual que los otros motores CA controlados bajo esta metodología, la curva de velocidad es bastante lisa y sigue la consigna de velocidad plenamente.

Con respecto al par desarrollado por el motor, éste, y el par de carga aplicado, se muestran en la figura 4.47. En dicha figura se observa que este motor en particular muestra bastante ruido en el torque generado, más que los motores CA anteriores, por lo que, al menos para este motor, sí sería necesaria todavía más resolución, con el fin de obtener una línea mucho más nítida. Apartando este hecho, se observa que el motor también tiende a mantener un par en su flecha acorde con el par de carga aplicado.

Pasando ahora a las variables eléctricas del sistema dq , se tienen las corrientes de los ejes directo y cuadratura, en las figuras 4.50 y 4.51 respectivamente. Para el caso de la corriente de eje directo, se observa que también la señal medida contiene bastante ruido, por lo que la línea roja que representa el valor deseado de la corriente de eje directo no se observa claramente. Sin embargo, se observa que la franja verde la corriente de eje directo medida se mantiene constante, por lo que, al menos, en este punto, el controlador sí está actuando adecuadamente. Como se ha mencionado anteriormente, sería cuestión de realizar las simulaciones con mayor resolución para obtener una señal más nítida.

Por otro lado, la corriente del eje de cuadratura presenta el mismo comportamiento. La línea roja que presenta el valor deseado de la corriente del eje de cuadratura proviene del controlador de velocidad, y está oculta debido al ruido de la señal de la corriente del eje de cuadratura medida. El controlador de corriente de eje de cuadratura cumple su función, puesto que la señal medida tiene la forma del valor deseado, lo que viene a confirmar el hecho

de que se requiere bastante resolución, especialmente con un motor de esta potencia nominal, para obtener señales nítidas.

Luego, en la figura 4.52 se presentan las tensiones de los ejes directo y cuadratura. Para este motor, se observa que, a diferencia de los dos motores anteriores, la tensión del eje de cuadratura no alcanza un valor tan alto. Por ejemplo, en el caso del motor de 10 hp, la tensión del eje de cuadratura supera los 250 V, mientras que, para este motor, la tensión de eje de cuadratura apenas llega hasta los 140 V. Esto puede deberse a que este motor tiene mucha más potencia, y maneja una intensidad de corriente mucho mayor que el motor de 10 hp, por lo que no se requiere tanta tensión para poder seguir las consignas de velocidad, sino que aprovecha y demanda más corriente. Sí se debe notar también que este motor sí consume mucha más tensión de eje directo, ya que el motor CA de 10 hp este parámetro alcanza un valor muy pequeño, de -10 V, mientras que para este motor esta tensión llega a ser cercana a los 100 V.

Ahora, se analizan los resultados obtenidos para este motor al operar con el esquema de control a lazo abierto, es decir, el control V/Hz. En la figura 4.53 se muestra la velocidad medida en el eje del motor, y su correspondiente valor deseado. Como se mencionó anteriormente, para este motor la velocidad tiende a oscilar demasiado, comportamiento que no se observó en los dos motores CA anteriores, y como se mencionó al inicio, los parámetros de las simulaciones fueron los mismos por los tres motores, por lo que, se considera que esta metodología no es apropiada para este motor, si se busca que el motor reemplace al motor CC actual.

Asimismo, esta oscilación de la velocidad también se manifiesta en el torque entregado por la máquina. Tal como se pudo observar en la figura 4.54, las oscilaciones de velocidad generan oscilaciones de torque, que, para este caso, alcanzan picos de hasta 300 N m, lo cual es sumamente dañino para el acople mecánico que pueda llevar el motor con la carga, por lo que definitivamente, esta metodología de control no es la más apropiada para este motor con esta carga.

Luego, pasando a las variables eléctricas, se tienen las tensiones en el estator medidas y sus valores deseados para cada fase, ambos en la figura 4.55. Al igual que para los otros dos motores CA, se observa que también las tensiones medidas tienden a ser ligeramente menores a sus valores deseados, pero de igual forma que sucedía con los otros motores, la amplitud varía con la velocidad.

La variación más relevante se observa en las corrientes medidas en el estator, mostradas en la figura 4.56. Se observa que aquí también las oscilaciones de velocidad y torque afectaron la amplitud de las ondas, de tal forma que se tiene un período entre $t = 3$ segundos y $t = 12$ segundos, en los cuales se dan picos de corriente cercanos a los 60 A, los cuales podrían ser bastante dañinos para un motor real, ya que podrían reducir la calidad de los aislamientos térmicos y, por ende, la vida útil del motor.

En síntesis, debido a los resultados anteriormente analizados, y en concordancia con la conclusión hecha en la sección anterior, las pruebas de simulación muestran que el motor de 10 hp es capaz de manejar la extrusora de manera apropiada, siguiendo las consignas de velocidad que se le imponen y manteniendo un par en su flecha cercano al par de la carga. Además, el motor CA de 10 hp funciona de manera apropiada tanto si se controla mediante el control vectorial indirecto con encoder, como si se le aplicara control escalar, aunque sus resultados son mucho mejores con el control retroalimentado.

5.3 Validación de la propuesta metodológica

La primera sección del capítulo anterior, fue la propuesta metodológica que se podría utilizar para reemplazar al motor CC por un motor CA con variador de velocidad en una aplicación industrial, que, para efectos de este trabajo, era la extrusora de plástico.

La metodología que se propuso para reemplazar el motor CC comprendía 3 etapas:

1. Análisis del sistema CC actual, en la cual se obtenían los datos de desempeño del motor, su comportamiento térmico y pruebas de control, en caso de ser estas últimas posibles, con el fin de tener un panorama completo sobre el sistema actual.
2. Selección de los motores CA candidatos, empezando por un motor CA de la misma capacidad. Luego un motor de capacidad inmediatamente inferior y luego uno de capacidad inmediatamente superior, con el fin de obtener los parámetros de desempeño y la característica térmica de cada uno de ellos y comparar estos datos con los datos existentes del motor CC actual. Asimismo, si es posible, realizar simulaciones de control para observar el comportamiento que tendría cada motor al manejar la carga.
3. Hacer una comparación de los resultados. Los parámetros de desempeño se analizaron desde una perspectiva cuantitativa, mientras que los resultados de las pruebas de control desde una perspectiva cualitativa. Al final, se decide cual es el motor CA más adecuado para reemplazar al motor CC actual.

Después de aplicar la metodología propuesta, se obtuvo una resolución para el problema de estudio, ya que se concluyó que, para reemplazar el motor CC actual, el candidato óptimo sería el motor CA de 10 hp, con un cualquiera de los esquemas de control estudiados. Se puede decir entonces que la metodología propuesta para resolver el problema es válida, ya que se siguieron los pasos establecidos en la propuesta y se llegó a una conclusión exitosa del problema.

Con respecto a los otros motores analizados, el motor de 20 hp podría ser una opción de respaldo, o de segundo lugar, ya que, su indicador más crítico fue el factor de potencia, ya que mostró alcanzar una temperatura de estado estacionario menor que la del motor CC, y su

característica par velocidad fue también muy cercana a la del motor CC, además de que tenía una eficiencia superior, pero un factor de potencia bastante bajo. Además de que en las pruebas de control tuvo resultados aceptables para control vectorial indirecto, pero no para el control V/Hz, debido a los picos que presenta tanto en velocidad como en torque. Se podría decir entonces que, este motor no sería una mala opción, pero no sería la opción óptima.

El motor de 5 hp se analizó ya que, en la biblioteca de MATLAB®, era el motor inmediatamente inferior al motor de 10 hp. Este motor tuvo la eficiencia más alta, y buen factor de potencia. Sus principales fallos estuvieron en la temperatura del estacionario y la velocidad. La temperatura que alcanza este motor es sumamente elevada, por lo que requeriría un espacio sumamente ventilado o un sistema de ventilación forzada adicional para disipar todo el calor. Las pruebas de control indican que este motor opera con un par de carga prácticamente igual al par nominal, lo cual se observa sobre todo en las gráficas de corriente, lo cual no es recomendable en la práctica, por lo que se dice que el motor prácticamente opera sobrecargado y no sería un reemplazo recomendado.

Finalmente, con respecto a la metodología propuesta, se indica que la variación entre las variables medidas debe ser bastante baja, sobre todo para la velocidad, no se establece un valor o porcentaje de referencia que ayude al personal a tener una mejor perspectiva sobre esta variación. Por los resultados obtenidos, lo más apropiado sería indicar un margen de error para la velocidad, y considerar que la diferencia entre las variables medidas no sea mayor al 2%, con el fin de que los resultados a obtener con el nuevo sistema sean mucho más cercanos a los obtenidos con el sistema actual.

Asimismo, la metodología propuesta puede ser utilizada en aplicaciones reales de extrusoras, ya que su aplicación no tiene una complejidad muy grande y los datos necesarios para llevarla a cabo son bastante accesibles por parte del personal técnico de las empresas. Se debe tomar en cuenta que el motor CA a especificar debe ser del tipo para uso con variador electrónico, y el motor no se debe ser rebobinado, dado que, según estudios de los fabricantes, por cada rebobinado de un motor, la eficiencia se reduce en un 5%. Si el motor a utilizar es rebobinado, el taller donde se lleve a cabo el proceso debe comprometerse a cumplir el CIV requerido en los motores para uso con variador electrónico.

CAPÍTULO 6: Conclusiones y recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos con las pruebas de simulación realizadas y los análisis hechos en el capítulo anterior, se desprenden las siguientes conclusiones y recomendaciones de este trabajo:

6.1 Conclusiones

1. Se propuso una metodología de fácil uso y que no involucra un nivel muy elevado de conocimiento para reemplazar un motor CC por uno de CA con un variador de velocidad en una aplicación real, que, para el caso de estudio de este trabajo, consistía en una extrusora. Los datos a utilizar para llevar a cabo la metodología propuesta son de fácil acceso, puesto que el personal técnico debe tener los datos del motor CC, y los fabricantes también tienden a poner a disposición de sus clientes los datos técnicos de sus productos.
2. Se demostró que la propuesta metodológica puede ser aplicada a una extrusora de plástico real, ya que los parámetros de simulación que se utilizaron para la carga son basados en datos de extrusora de plástico reales, lo cual les da más credibilidad a los resultados obtenidos, especialmente en las pruebas de control.
3. Se realizaron pruebas en el entorno de simulación Simulink® para obtener resultados de desempeño, como la eficiencia, el factor de potencia y la curva par velocidad, de motores CC y CA. Estas pruebas, además, estuvieron amparadas en los lineamientos establecidos por estándares internacionales, lo que les da validez a los resultados obtenidos.
4. Se utilizó el entorno Simulink® también para desarrollar pruebas de control exitosas, tanto para el motor CC como para motores CA, que permitieran verificar cual sería el comportamiento de los motores al manejar la extrusora.
5. Se comprobaron varios de los aspectos teóricos referentes a las máquinas eléctricas, tales como las metodologías de control para motores eléctricos, las eficiencias que muestran los motores, y el comportamiento térmico de los motores eléctricos. Si bien es cierto, fue en simulaciones, de igual manera, se observa que los resultados obtenidos están acordes con la teoría expuesta.
6. Se detallaron también otros aspectos eléctricos y mecánicos que también se deben considerar a la hora de realizar un reemplazo, especialmente en un escenario real, ya que estos detalles también son importantes para realizar el reemplazo de manera exitosa, no solamente las pruebas de desempeño y control.

6.2 Recomendaciones

1. Se deben realizar pruebas experimentales que permitan constatar los resultados obtenidos con estas pruebas de simulación realizadas. Si bien es cierto, los resultados obtenidos en este proyecto se pueden clasificar como fidedignos, especialmente por las magnitudes, sería importante verificar dichos valores con un sistema real.
2. Se deben incorporar las correcciones correspondientes por temperatura en las pruebas de eficiencia, ya que, entre las limitaciones que se tuvo al realizar el trabajo en simulación, es que el modelo del motor de Simulink® es un modelo electromecánico y no incorpora variaciones por temperatura. Los resultados obtenidos, especialmente para los motores CA son muy cercanos a los obtenidos con los motores de ABB, pero aun así sería apropiado intentar incorporar estas variaciones para ver que tanto pueden diferir los resultados.
3. En caso de que este proyecto se desee repetir, sería necesario contar con un hardware más apropiado. Como se pudo observar, varios de los resultados obtenidos fueron bastante difusos, especialmente para CA, debido a que la simulación se realizó con una frecuencia de muestreo baja, por lo que, se requeriría de un procesador mucho mejor para repetir estas pruebas.
4. Referente a las pruebas de laboratorio, también se deben comprobar los aspectos eléctricos y mecánicos que se citaron en el marco teórico. Debido a que este fue un proyecto de simulación, estos aspectos no se pudieron considerar, pero en un montaje de laboratorio real, estos aspectos se deben tomar en cuenta también para ampliar aún más la metodología propuesta.

BIBLIOGRAFÍA

- ABB, *Energy Efficiency- the fast track to a sustainable energy future*, Zurich, Switzerland, 2015. Recuperado el 24 de octubre de <https://new.abb.com/docs/default-source/better-world/abb-energy-efficiency-paper.pdf>
- Allance (s.f.). *How to break down an electric motor for copper*. Consultado el 1 de mayo de <https://www.copperwiregranulator.com/gallery/How-to-Break-Down-an-Electric-Motor-for-.html>
- Allen-Bradley (2019). *Wiring and Grounding for Pulse Width Modulated (PWM) AC Drives*. Recuperado de https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/drives-in001_-en-p.pdf
- Allen-Bradley (1992). *Thyristor Regulated DC Motor Control Theory*.
- Allen-Bradley (2013). *PowerFlex 70/700 Adjustable Frequency AC Drives*. Recuperado de https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/pflex-rm001_-en-e.pdf
- Anónimo, (2019). “*Variable Frequency Drive or VFD*” Consultado el 11 de junio de <https://www.electrical4u.com/variable-frequency-drive/>
- Anónimo, (2015). “*Auto tuning of VFD’s*”. Consultado el 2 de agosto de <http://www.drivesandsystems.com/auto-tuning-vfd/>
- Barnes, M. (2003). *Practical variable speed drives and power electronics*. Oxford Burlington, MA: Newnes.
- Bonanomi, A. (2015). “*Disc Couplings Improve Product Performance*”. Consultado el 8 de febrero de <https://www.powertransmissionworld.com/disc-couplings-improve-product-performance/>
- Bose, B. (1997). *Power electronics and variable frequency drives: technology and applications*. Piscataway, NJ: IEEE Press.
- Boteler, R. (2013). *NEMA 2013 Electric Motor Rulemaking Status Report*. Consultado el 4 de julio de <https://www.pumpsandsystems.com/nema-2013-electric-motor-rulemaking-status-report>
- Bullick, J. (2016). *VFD Regenerative Applications*. Consultado el 1 de mayo de <https://www.kebamerica.com/blog/vfd-regenerative-applications/>
- Canadian Standards Association. *Test Methods, Marking Requirements and Energy Efficiency Levels for Three-phase Induction Motors*. Ottawa, Canadá: IHS.

- Cárdenas-Dobson, R. (2011) “*Control Vectorial de Máquinas de Inducción Jaula de Arzilla*”. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Chapman, S. (2012). *Máquinas eléctricas*. México: McGraw-Hill.
- Chiasson, J. (2005). *Modeling and high-performance control of electric machines*. Hoboken, N.J: John Wiley.
- Collins, D. (2020). *What is International Efficiency (IE) standards for motors and gearmotors?* Consultado el 1 de mayo de <https://www.motioncontroltips.com/what-are-international-efficiency-standards-for-motors-and-gearmotors/>
- Collins, D. (2016). “*What are VFD reflected waves and why are they harmful?*”. Consultado el 14 de febrero de <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-vfd-reflected-waves-and-why-are-they-harmful/>
- Corrales, J. (1969). *La Máquina Eléctrica: Teoría Construcción y Funcionamiento, vol. I*. Editorial Labor: Madrid, España.
- Das, M. (2008). *Effect of screw speed and plasticizer on the torque requirement in single screw extrusion of starch-based plastics and their mechanical properties*. Consultado el 4 de julio de <https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-screw-speed-and-plasticizer-on-the-torque-Das/f2724dc64bcf4bb9320e3bece8d3631e8473f0af>
- Dpto. de Energía de EUA (2012). “*The Importance of Motor Shaft Alignment*”. Consultado 8 de febrero de https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/importance_motor_shaft_motor_systems4.pdf
- Dpto. de Energía de EUA (2012). “*When Should Inverter-Duty Motors Be Specified*”. Consultado el 14 de febrero de https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/motor_tip_sheet14.pdf
- Drives and Automation (s.f.). “*Ingress Protection, IP Ratings*”. Consultado el 13 de febrero de <http://www.drivesandautomation.co.uk/useful-information/ingress-protection-ip-ratings/>
- Dynisco (s.f.). *The Dynisco Extrusion Processors Handbook, 2nd Edition*. Consultado el 1 de mayo de https://www.dynisco.com/userfiles/files/27429_Legacy_Txt.pdf
- Edvard (2013). “*7 Most Common Motor Enclosure Types Defined by NEMA Standard*”. Consultado el 12 de febrero de <https://electrical-engineering-portal.com/7-most-common-motor-enclosure-types-defined-by-nema-standards>

- Electrical Academia (s.f.). *Losses and Efficiency of DC Machine*. Consultado el 1 de mayo del 2021 en <https://electricalacademia.com/dc-machines/losses-efficiency-dc-machine/>
- Elektrim Motors (2014). “*NEMA & IEC Mounting Positions*”. Consultado el 11 de febrero de <http://www.elektrimmotors.com/iec-motor-nema-mounting-positions>
- Elvatron S.A. (12 de enero, 2018). *Heavy Duty vs. Normal Duty* [archivo de video]. Consultado el 9 de agosto del 2019 en <https://www.youtube.com/watch?v=xGlZlSciAVg>
- EnergyPurse (s.f.). *Motor Efficiency Classes as defined by EIC/EN 60034-30-1:2014*. Consultado el 1 de mayo del 2021 en <https://www.energypurse.com/motor-efficiency-classes-as-defined-by-iec-en-60034-30-1-2014/>
- Fitzgerald, A., Kingsley, C. & Umans, S. (2003). *Electric machinery*. Boston, Mass: McGraw-Hill.
- G. Kulak, E. Nowicki and W. Rosehart, "Engineering considerations when replacing an old DC drive system," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Chicago, IL, USA, 2002, pp. 664-668 vol.2. doi: 10.1109/PESS.2002.1043377
- Giri, F. (2013). *AC electric motors control: advanced design techniques and applications*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc.
- Holtz, B. (s.f.). *Types of Couplings*. Consultado el 7 de julio de <https://www.rexnord.com/blog/articles/types-of-couplings>
- Hughes, A. (2006). *Electric motors and drives: fundamentals, types, and applications*. Amsterdam Boston: Elsevier/Newnes.
- IEEE Guide: Test Procedures for Direct-Current Machines," in *ANSI/IEEE Std 113-1985*, vol., no., pp.1-38, 21 Dec. 1984 doi: 10.1109/IEEESTD.1984.81710
- Jones, E. (2016). “*Introduction to the Auto Tune Function*”. Consultado el 4 de agosto de <https://blog.galco.com/introduction-to-the-auto-tune-function-a-galco-blog-tech-tip/>
- Krishnan, R. (2001). *Electric motor drives: modeling, analysis, and control*. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall.
- Leonhard, W. (1996). *Control of electrical drives*. Berlin: Springer.
- Mar Dustrial Inc. (2011). “*Shaft Misalignment 101: Radial, Angular and Axial*”. Consultado el 8 de febrero de <https://www.mardustrial.com/blog/falk-couplings-and-shaft-misalignment-101-radial-angular-and-axial-07-25-2011/>

- Mazziotta, S. (2020). “*Electric Motor Insulation Class – What is it?*”. Consultado el 14 de febrero de <https://www.hecoinc.com/blog/electric-motor-insulation-class-what-is-it>
- Melfi, M. “A Comparison of the Characteristics of AC and DC Motors”, presented to The Association of Iron and Steel Engineers. Pittsburgh, PA, USA. 1993.
- Nyberg, C. (2006) “*Basic Electric Motor Bearing Types, Loads and Applications*”. Consultado el 13 de febrero de <https://easa.com/resources/resource-library/basic-electric-motor-bearing-types-loads-and-applications-1>
- Rashid, M. (2011). *Power electronics handbook: devices, circuits, and applications*. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann.
- Rockwell Automation. “Load Characteristics”, 2001.
- Rockwell Automation. “Drives Engineering Handbook”, 2001. Consultado el 4 de Agosto en https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/at/drive-at001_-en-p.pdf
- Rockwell Automation (22 de septiembre, 2017). *Reflected Wave and Understanding Motor Lead Length Restrictions* [archive de video]. Consultado el 1 de mayo 2021 de <https://www.youtube.com/watch?v=JDkcU9d-SXA>
- S. Barlow (s.f.), “Extruder Retrofit Considerations & Preparation”. Integrated Control Technologies, Carrollton, Texas.
- S. Barlow (s.f.), “Reducing Electrical Energy Costs for Extrusion Processes”. Integrated Control Technologies, Carrollton, Texas.
- Sen, P. (1997). *Principles of electric machines and power electronics*. New York: John Wiley & Sons.
- Sfeir, R. A. (2008). Measured Savings of CC to CA Drive Retrofit in Plastic Extrusion. Energy Systems Laboratory (<http://esl.tamu.edu>); Texas A&M University (<http://www.tamu.edu>). Available electronically from <http://hdl.net/1969.1/88019>.
- Sul. (2011). *Control of electric machine drive systems*. Hoboken, New Jersey: IEEE Press Wiley
- THOMAS (s.f.) “*Types of Bearings – A Thomas Buying Guide*”. Consultado el 13 de febrero de <https://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools-supplies/bearing-types/>
- U.S. Department of Energy (2014). *Premium Efficiency Motor Selection and Application Guide: A Handbook for Industry*. Consultado el 1 de mayo de https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/amo_motors_handbook_web.pdf

Valverde, A. (2018). *Transmisión de Potencia: ¿Cómo seleccionar el acople ideal para su aplicación?* Consultado el 8 de febrero de <https://www1.elvatron.com/transmicion-potencia/c%C3%B3mo-seleccionar-el-acople-ideal-para-su-aplicaci%C3%B3n>

APÉNDICES

En esta sección se muestran los resultados de las pruebas de eficiencia realizadas para los motores CC y CA, y se incluyen también los datos de los motores CA de ABB utilizados para darles validez a los resultados obtenidos.

AP.1 Resultados pruebas de eficiencia Motor CC MATLAB® con resistencia serie

| Prueba con devanado serie | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--------------------|----------------------|------------------------|----------|-----------------|------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|----------------------|---------------------|------------------------------|-----------------------|----------------|
| Porcentaje carga nominal (%) | Par de prueba (Nm) | Tensión armadura (V) | Corriente armadura (A) | Pin (W) | Pérdidas Cu (W) | Pérdidas escobilla (W) | Potencia convertida (W) | Pérdidas núcleo (W) | Pérdidas mecánicas (W) | Pérdidas misceláneas (W) | Pérdidas totales (W) | Potencia salida (W) | Velocidad rotacional (r/min) | Torque de salida (Nm) | Eficiencia (%) |
| 150 | 61,04 | 500 | 27,9 | 13950,00 | 197,20 | 55,80 | 13697,00 | 1491,4 | 1118,55 | 74,57 | 2937,52 | 11012,48 | 1615 | 62,55 | 0,76 |
| 125 | 50,86 | 500 | 23,38 | 11690,00 | 165,25 | 46,76 | 11477,99 | 1491,4 | 1118,55 | 74,57 | 2896,53 | 8793,47 | 1647 | 52,41 | 0,77 |
| 100 | 40,69 | 500 | 18,87 | 9435,00 | 133,37 | 37,74 | 9263,89 | 1491,4 | 1118,55 | 74,57 | 2855,63 | 6579,37 | 1697 | 42,29 | 0,80 |
| 75 | 30,52 | 500 | 14,35 | 7175,00 | 101,43 | 28,70 | 7044,87 | 1491,4 | 1118,55 | 74,57 | 2814,65 | 4360,35 | 1732 | 32,17 | 0,81 |
| 50 | 20,35 | 500 | 9,836 | 4918,00 | 69,52 | 19,67 | 4828,81 | 1491,4 | 1118,55 | 74,57 | 2773,71 | 2144,29 | 1763 | 22,05 | 0,44 |
| 25 | 10,17 | 500 | 5,317 | 2658,50 | 37,58 | 10,63 | 2610,29 | 1491,4 | 1118,55 | 74,57 | 2732,73 | 74,23 | 1795 | 11,92 | 0,03 |
| 0 | 0,00 | 500 | 0,8017 | 400,85 | 5,67 | 1,60 | 393,58 | 1491,4 | 1118,55 | 74,57 | 2691,79 | 0,00 | 1844 | 1,797 | 0,00 |

AP.2 Resultados pruebas de eficiencia motor CC MATLAB® sin resistencia serie

| Prueba sin devanado serie | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------------------|----------------------|------------------------|----------|-----------------|------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|----------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------|------------|
| Porcentaje corriente nominal (W) | Par de prueba (Nm) | Tensión armadura (V) | Corriente armadura (A) | Pin (W) | Pérdidas Cu (W) | Pérdidas escobilla (W) | Potencia convertida (W) | Pérdidas núcleo (W) | Pérdidas mecánicas (W) | Pérdidas misceláneas (W) | Pérdidas totales (W) | Potencia salida (W) | Velocidad rotacional (rpm) | Torque de salida (Nm) | Eficiencia |
| 150 | 61,04 | 500 | 27,95 | 13975,00 | 131,70 | 55,90 | 13787,40 | 1491,4 | 1118,55 | 74,57 | 2872,12 | 11102,88 | 1651 | 62,64 | 0,77 |
| 125 | 50,86 | 500 | 23,42 | 11710,00 | 110,36 | 46,84 | 11552,80 | 1491,4 | 1118,55 | 74,57 | 2841,72 | 8868,28 | 1685 | 52,5 | 0,79 |
| 100 | 40,69 | 500 | 18,9 | 9450,00 | 89,06 | 37,80 | 9323,14 | 1491,4 | 1118,55 | 74,57 | 2811,38 | 6638,62 | 1725 | 42,36 | 0,81 |
| 75 | 30,52 | 500 | 14,37 | 7185,00 | 67,71 | 28,74 | 7088,55 | 1491,4 | 1118,55 | 74,57 | 2780,97 | 4404,03 | 1763 | 32,22 | 0,83 |
| 50 | 20,35 | 500 | 9,851 | 4925,50 | 46,42 | 19,70 | 4859,38 | 1491,4 | 1118,55 | 74,57 | 2750,64 | 2174,86 | 1787 | 22,08 | 0,44 |
| 25 | 10,17 | 500 | 5,325 | 2662,50 | 25,09 | 10,65 | 2626,76 | 1491,4 | 1118,55 | 74,57 | 2720,26 | 57,76 | 1814 | 11,94 | 0,02 |
| 0 | 0,00 | 500 | 0,8023 | 401,15 | 3,78 | 1,60 | 395,76 | 1491,4 | 1118,55 | 74,57 | 2689,91 | 0,00 | 1845 | 1,798 | 0,00 |

AP.6 Datos de desempeño motor 10 hp ABB

BALDOR • RELIANCE Paquete de información de producto: CECP3774T - 10HP,1760RPM,3PH,60HZ,215TC,0748M,TEFC,F

AC Induction Motor Performance Data
Record # 25097
Typical performance - not guaranteed values

| Winding: 07WGX776-R016 | | Type: 0748M | Enclosure: TEFC | |
|------------------------|-------------------|---------------------------|--|--|
| Nameplate Data | | | 460 V, 60 Hz: High Voltage Connection | |
| Rated Output (HP) | 10 | Full Load Torque | 29.8 LB-FT | |
| Volts | 230/460 | Start Configuration | direct on line | |
| Full Load Amps | 25/12.5 | Breakdown Torque | 87 LB-FT | |
| R.P.M. | 1760 | Pull-up Torque | 51.9 LB-FT | |
| Hz | 60 Phase | Locked-rotor Torque | 57.5 LB-FT | |
| NEMA Design Code | A KVA Code | Starting Current | 88.5 A | |
| Service Factor (S.F.) | 1.15 | No-load Current | 5.12 A | |
| NEMA Nom. Eff. | 92.4 Power Factor | Line-line Res. @ 25°C | 0.973 Ω | |
| Rating - Duty | 40C AMB-CONT | Temp. Rise @ Rated Load | 60°C | |
| S.F. Amps | | Temp. Rise @ S.F. Load | 76°C | |
| | | Locked-rotor Power Factor | 35 | |
| | | Rotor inertia | 1.18 LB-FT ² | |

Load Characteristics 460 V, 60 Hz, 10 HP

| % of Rated Load | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | S.F. |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Power Factor | 44 | 67 | 78 | 82 | 84 | 85 | 83 |
| Efficiency | 90 | 92.9 | 93.1 | 92.5 | 91.4 | 90.1 | 91.8 |
| Speed | 1790 | 1781 | 1771 | 1762 | 1750 | 1739 | 1755 |
| Line amperes | 5.84 | 7.52 | 9.75 | 12.3 | 15.2 | 18.3 | 14 |

AP.7 Datos de desempeño motor 5 hp ABB

BALDOR • RELIANCE Paquete de información de producto: CEBM3615T - 5HP, 1750RPM, 3PH, 60HZ, 184TC, 3642M, TEFC, F1

AC Induction Motor Performance Data
Record # 35063
Typical performance - not guaranteed values

| Winding: 36WGS268-R016 | | Type: 3642M | Enclosure: TEFC |
|------------------------|-------------------|--|--------------------------|
| Nameplate Data | | 460 V, 60 Hz: High Voltage Connection | |
| Rated Output (HP) | 5 | Full Load Torque | 14.9 LB-FT |
| Volts | 230/460 | Start Configuration | direct on line |
| Full Load Amps | 13.4/6.7 | Breakdown Torque | 52.2 LB-FT |
| R.P.M. | 1750 | Pull-up Torque | 31.5 LB-FT |
| Hz | 60 Phase | Locked-rotor Torque | 34.9 LB-FT |
| NEMA Design Code | B KVA Code | Starting Current | 49.1 A |
| Service Factor (S.F.) | 1.15 | No-load Current | 3.24 A |
| NEMA Nom. Eff. | 89.5 Power Factor | Line-line Res. @ 25°C | 2.27 Ω |
| Rating - Duty | 40C AMB-CONT | Temp. Rise @ Rated Load | 71°C |
| S.F. Amps | | Temp. Rise @ S.F. Load | 87°C |
| | | Locked-rotor Power Factor | 39.8 |
| | | Rotor inertia | 0.391 LB-FT ² |

Load Characteristics 460 V, 60 Hz, 5 HP

| % of Rated Load | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | S.F. |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Power Factor | 39 | 60 | 72 | 78 | 83 | 83 | 81 |
| Efficiency | 85 | 89.7 | 90.6 | 89.6 | 88.6 | 87 | 89 |
| Speed | 1789 | 1776 | 1762 | 1750 | 1733 | 1714 | 1740 |
| Line amperes | 3.55 | 4.31 | 5.43 | 6.65 | 7.94 | 9.64 | 7.42 |

AP.8 Datos de desempeño motor 20 hp ABB

BALDOR • RELIANCE Paquete de información de producto: CECP82334T-4 - 20HP,1760RPM,3PH,60HZ,256TC,TEFC,F1

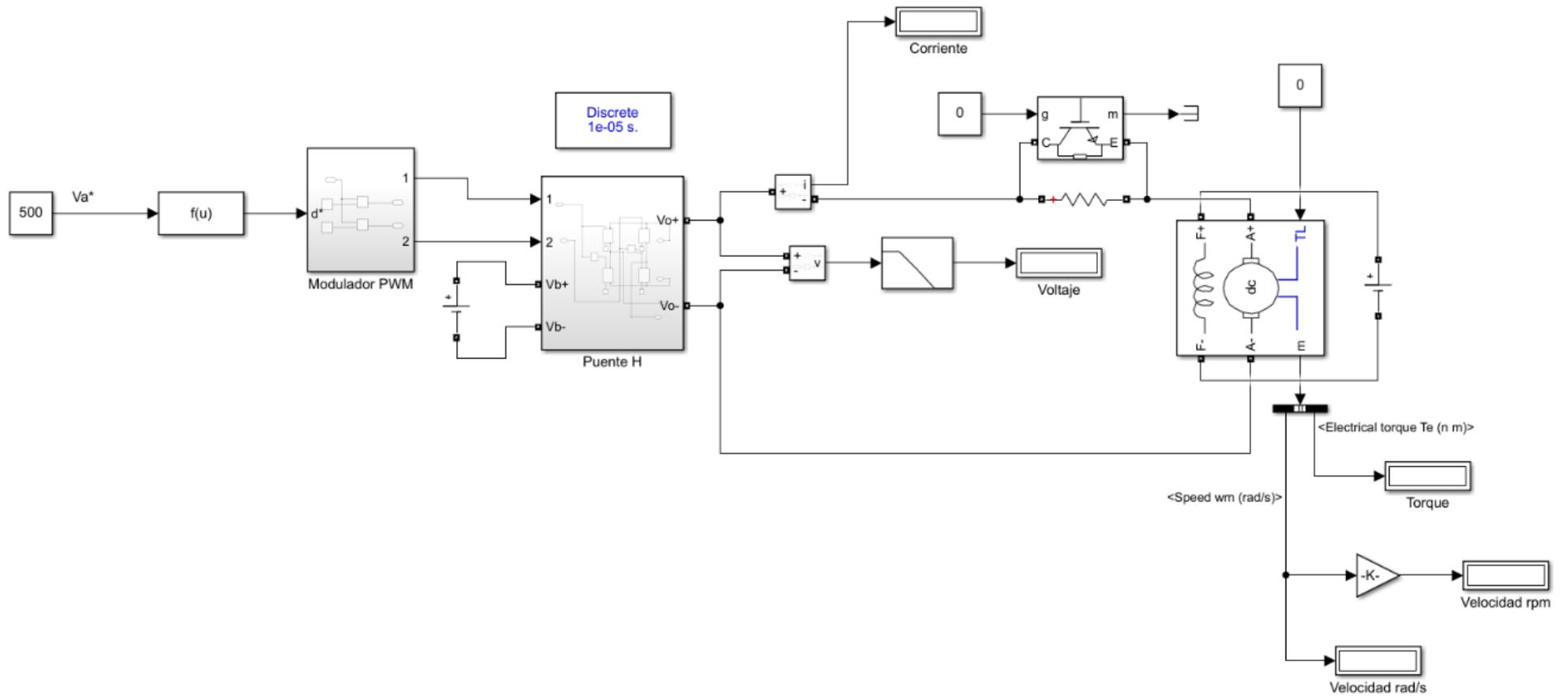
AC Induction Motor Performance Data
Record # 72858
Typical performance - not guaranteed values

| Winding: 09WGT417-R001 | | Type: 0964M | Enclosure: TEFC |
|------------------------|-----------------|---|-----------------|
| Nameplate Data | | 460 V, 60 Hz: Single Voltage Motor | |
| Rated Output (HP) | 20 | Full Load Torque | 59.51 LB-FT |
| Volts | 460 | Start Configuration | direct on line |
| Full Load Amps | 23 | Breakdown Torque | 185 LB-FT |
| R.P.M. | 1760 | Pull-up Torque | 94.7 LB-FT |
| Hz | 60 Phase | Locked-rotor Torque | 115 LB-FT |
| NEMA Design Code | B KVA Code | Starting Current | 157 A |
| Service Factor (S.F.) | 1.15 | No-load Current | 7 A |
| NEMA Nom. Eff. | 93 Power Factor | Line-line Res. @ 25°C | 0.41873 Ω |
| Rating - Duty | 40C AMB-CONT | Temp. Rise @ Rated Load | 60°C |
| S.F. Amps | | Temp. Rise @ S.F. Load | 76°C |
| | | Locked-rotor Power Factor | 29.4 |

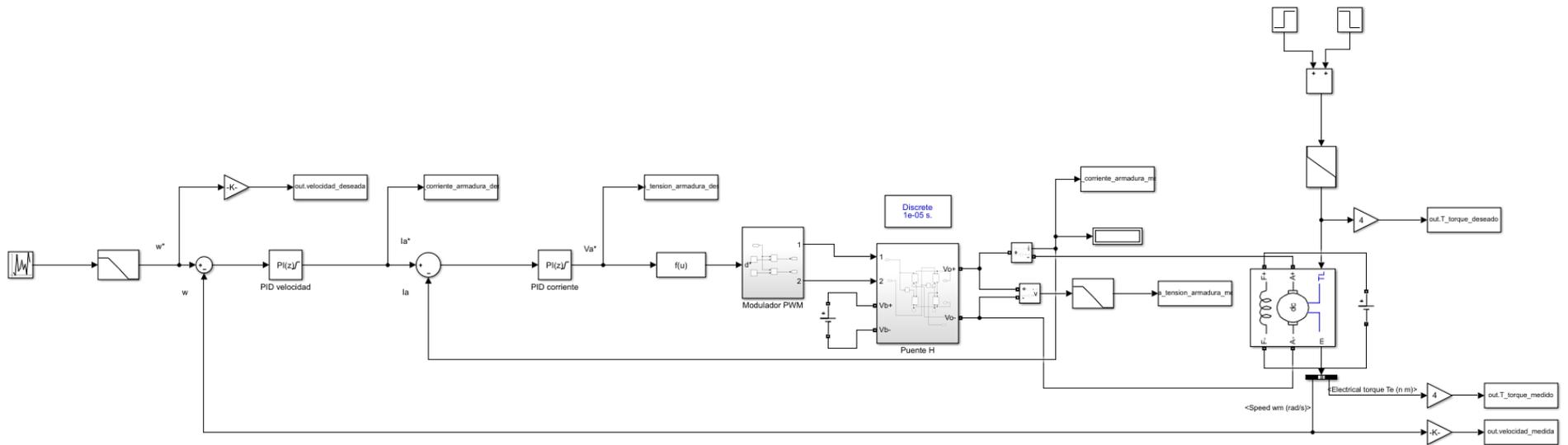
Load Characteristics 460 V, 60 Hz, 20 HP

| % of Rated Load | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | S.F. |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|------|--------|------|
| Power Factor | 58 | 78 | 85 | 88 | 88 | 88 | 88 |
| Efficiency | 91.4 | 93.8 | 93.9 | 93.3 | 92.3 | 91 | 92.7 |
| Speed | 1792.1 | 1783.4 | 1774.6 | 1764.6 | 1754 | 1740.6 | 1758 |
| Line amperes | 8.93 | 12.8 | 17.6 | 22.9 | 28.7 | 35.1 | 26.4 |

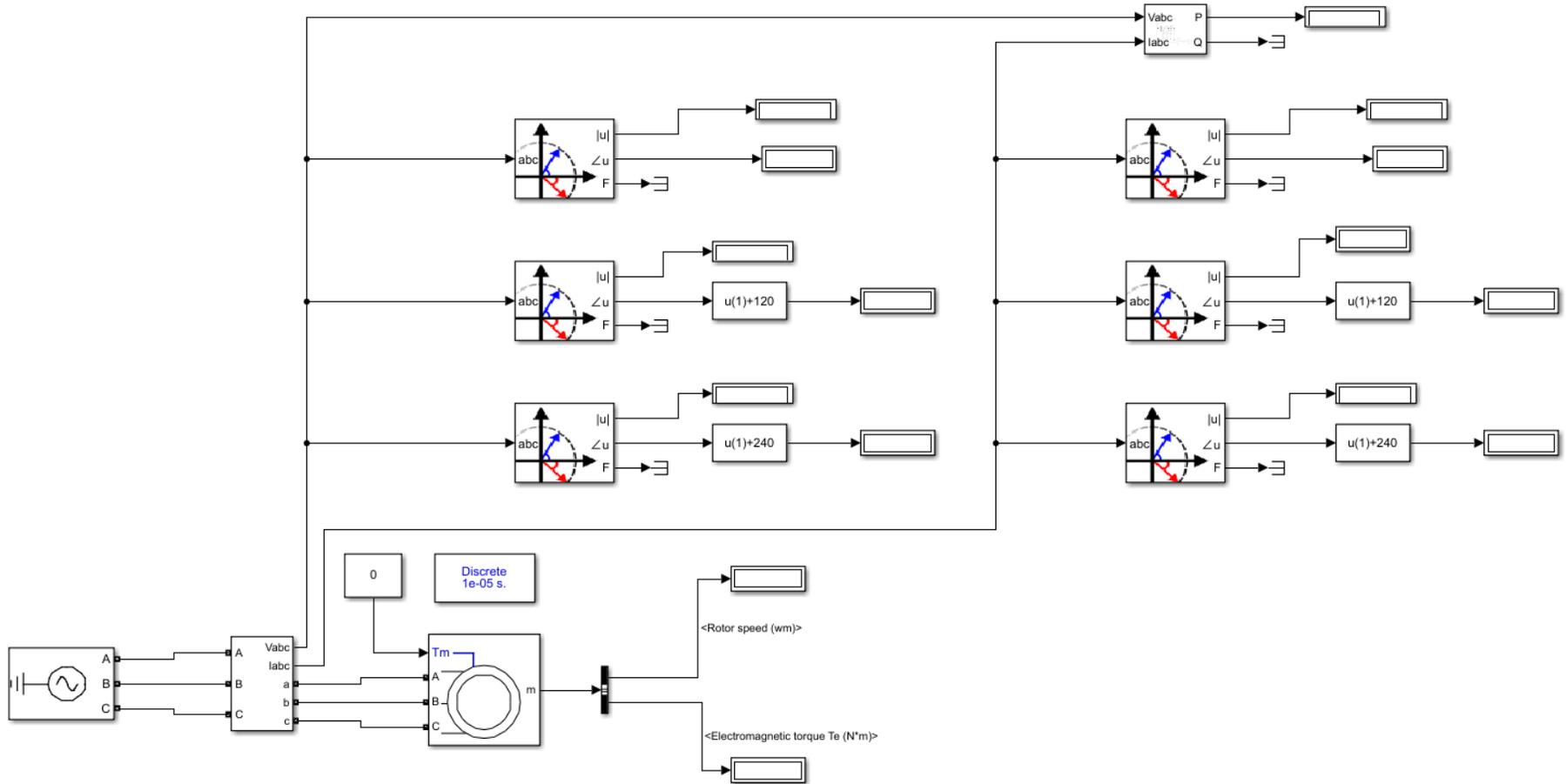
AP.9 Esquemático utilizado para las pruebas de eficiencia del sistema CC (generado con Simulink®)



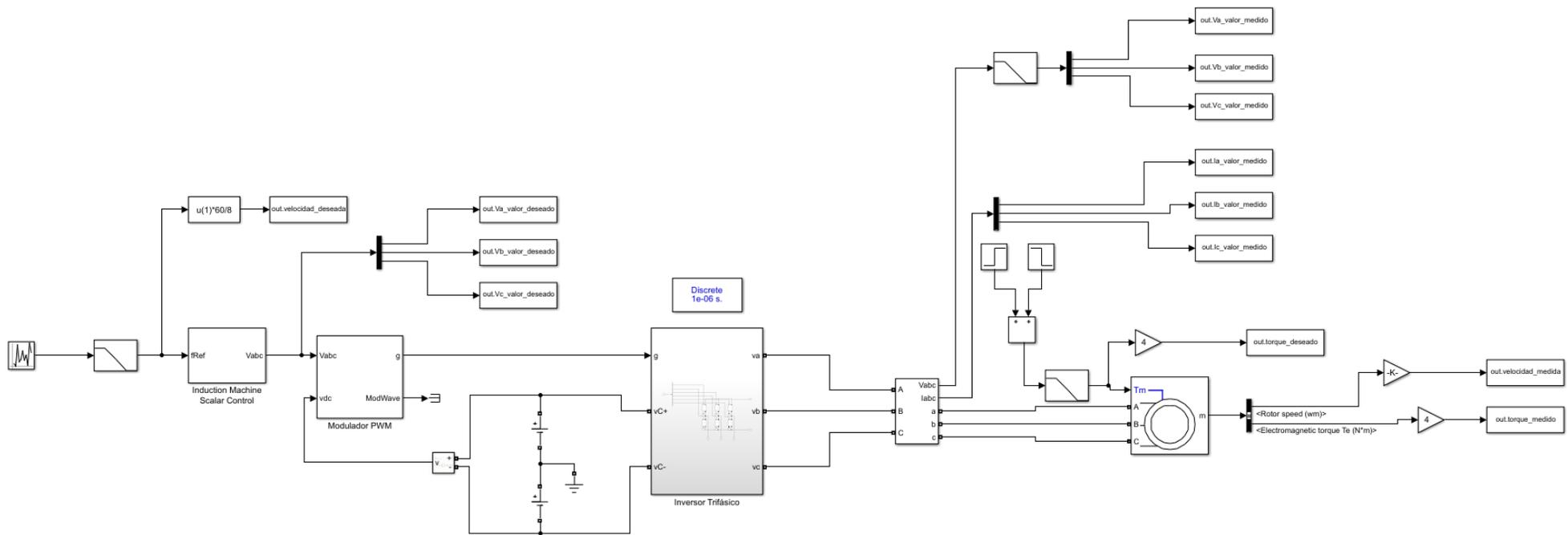
AP.10 Esquemático utilizado para las pruebas de control del sistema Extrusora de Plástico con motor CC (generado con Simulink®)



AP.11 Esquemático típico utilizado para las pruebas de eficiencia para los motores de CA (generado con Simulink®)



AP.13 Esquemático típico utilizado para las pruebas de control escalar de los motores CA operando la extrusora de plástico (generado con Simulink®)



AP.14 Código de MATLAB® utilizado para generar la curva térmica del motor CC

```
%Universidad de Costa Rica
%Facultad de Ingeniería
%Escuela de Ingeniería Eléctrica

%Trabajo Final de Graduación: "Metodología para el reemplazo de motores
%de corriente continua por motores de corriente alterna con variadores de
%velocidad en extrusoras de plástico"

%Kabir Bonilla Vega B31084

%Calculo de la temperatura para el motor CC en las pruebas de velocidad y
%torque

clc

%Datos importantes
t = (0:10:10800)'; %tiempo de simulación
Rcc = 4.712; %resistencia armadura motor CC, en ohms
tamb = 25; %temperatura ambiente, en C
w_motor = 183.705; %peso del motor, en kg
w_cobre = w_motor*0.18; %peso del cobre motor, en kg
c_cu = 390; %calor especifico del cobre, en J/kg C
H = c_cu*w_cobre; %capacidad termica del motor, en J/C
iCC = 9.583; %corriente de armadura en estado estacionario
Kd = 13; %Coeficiente de ventilación W/m2 C;
Sd = (1.476*0.3239); %Superficie efectiva de ventilación m2

%Calculo de la temperatura en el devanado de armadura
tau = H/(Kd*Sd);
Tss = (iCC^2*Rcc)/(Kd*Sd);
T = tamb + (Tss*(1-exp(-t./tau)));

%Grafica de la temperatura en función del tiempo
plot(t,T)
grid on
xlabel('tiempo')
ylabel('Temperatura (C)')
%title('Temperatura Devanado Armadura Motor CC')
legend('Temperatura, Ta (C)')
```

AP.15 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas térmicas de los motores CA

```

%Universidad de Costa Rica
%Facultad de Ingeniería
%Escuela de Ingeniería Eléctrica

%Trabajo Final de Graduación: "Metodología para el reemplazo de motores
%de corriente continua por motores de corriente alterna con variadores de
%velocidad en extrusoras de plástico"

%Kabir Bonilla Vega B31084

%Calculo de la temperatura para los motores CA en las pruebas de velocidad y
%torque

clc

%% Datos importantes
t = (0:10:(3600*15))'; %tiempo de simulación
tamb = 25; %temperatura ambiente, en C
Con_Cu = 390; %calor específico del cobre, en J/kg C
Kd = 13; %coeficiente de ventilacion, W/m2 C

%% Motor 5hp 460V
Rac1 = 1.115; %resistencia estator motor CA, en ohms
W_motor1 = 45.81820; %peso motor kg
W_cobre1 = W_motor1*0.09; %cantidad cobre motor kg
Con1 = W_cobre1*Con_Cu; %calor específico del cobre en el motor
IaRMS1 = 7.859/sqrt(2); %corriente RMS fase A, amperes
Sd1 = pi*(0.100203^2); %superficie de refrigeracion, m2

%Calculo de la temperatura en el devanado de estator
taul = Con1/(Kd*Sd1);
Tss1 = (IaRMS1^2*Rac1)/(Kd*Sd1);
T1 = tamb + (Tss1*(1-exp(-t./taul)));

%Grafica de la temperatura en función del tiempo
plot(t,T1)
grid on
xlabel('tiempo')
ylabel('Temperatura (C)')
%title('Temperatura promedio devanados de estator, Motor 5hp 460V')
legend('Temperatura Ts (C)')

%% Motor 10hp 460V
Rac3 = 0.6837; %resistencia estator motor CA, en ohms
W_motor3 = 104.78; %peso motor kg
W_cobre3 = W_motor3*0.09; %cantidad cobre motor kg
Con3 = W_cobre3*Con_Cu; %calor específico del cobre en el motor
IaRMS3 = 8.954/sqrt(2); %corriente RMS fase A, amperes

```

```

Sd3 = pi*(0.10795^2); %superficie de refrigeracion, m2

%Calculo de la temperatura en el devanado de estator
tau3 = Con3/(Kd*Sd3);
Tss3 = (IaRMS3^2*Rac3)/(Kd*Sd3);
T3 = tamb + (Tss3*(1-exp(-t./tau3)));

%Grafica de la temperatura en función del tiempo
figure
plot(t,T3)
grid on
xlabel('tiempo')
ylabel('Temperatura (C)')
%title('Temperatura promedio devanados de estator, Motor 10hp 460V')
legend('Temperatura Ts (C)')

%% Motor 20hp 460V
Rac5 = 0.2761; %resistencia estator motor CA, en ohms
W_motor5 = 161.479; %peso motor kg
W_cobre5 = W_motor5*0.09; %cantidad cobre motor kg
Con5 = W_cobre5*Con_Cu; %calor específico del cobre en el motor
IaRMS5 = 13.01/sqrt(2); %corriente RMS fase A, amperes
Sd5 = pi*(0.127^2); %superficie de refrigeracion, m2

%Calculo de la temperatura en el devanado de estator
tau5 = Con5/(Kd*Sd5);
Tss5 = (IaRMS5^2*Rac5)/(Kd*Sd5);
T5 = tamb + (Tss5*(1-exp(-t./tau5)));

%Grafica de la temperatura en función del tiempo
figure
plot(t,T5)
grid on
xlabel('tiempo')
ylabel('Temperatura (C)')
%title('Temperatura promedio devanados de estator, Motor 20hp 460V')
legend('Temperatura Ts (C)')

```

AP.16 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas de control del motor CC

```

%Universidad de Costa Rica
%Facultad de Ingeniería
%Escuela de Ingeniería Eléctrica

%Trabajo Final de Graduación: "Metodología para el reemplazo de motores
%de corriente continua por motores de corriente alterna con variadores de
%velocidad en extrusoras de plástico"

%Kabir Bonilla Vega B31084

%Graficacion de las variables electricas y mecanicas de salida de la prueba
%de control del motor CC de 10 hp

clc
clear all

%Ejecución del archivo de Simulink
sim('motorCC10hp','SimulationMode','Accelerator');

%Definición de variable de tiempo
t = (0:0.001:30)';

%Grafica de la velocidad
v_valor_deseado = ans.velocidad_deseada;
v_valor_medido = ans.velocidad_medida;
plot(t,v_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,v_valor_medido,'g')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad rotacional (rpm)')
legend('Velocidad deseada w*', 'Velocidad medida w')

%Grafica del torque
t_valor_deseado = ans.T_torque_deseado;
t_valor_medido = ans.T_torque_medido;
figure
plot(t,t_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,t_valor_medido, 'g')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Torque desarrollado (Nm)')
legend('Torque de carga, TL', 'Torque medido, Tout')

%Grafica de la tension de armadura
Va_valor_deseado = ans.Va_tension_armadura_deseada;
Va_valor_medido = ans.Va_tension_armadura_medida;

```

```
figure
plot(t,Va_valor_deseado,'r')
hold on
plot(t,Va_valor_medido,'b')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión de armadura deseada, Va*', 'Tensión de armadura medida, Va')

%Grafica de la corriente de armadura
Ia_valor_deseado = ans.Ia_corriente_armadura_deseada;
Ia_valor_medido = ans.Ia_corriente_armadura_medida;
figure
plot(t,Ia_valor_deseado,'r')
hold on
plot(t,Ia_valor_medido,'b')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente de armadura deseada, Ia*', 'Corriente de armadura medida, Ia')
```

AP.17 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas de control del motor CA de 10 hp con control vectorial indirecto

```

%Universidad de Costa Rica
%Facultad de Ingeniería
%Escuela de Ingeniería Eléctrica

%Trabajo Final de Graduación: "Metodología para el reemplazo de motores
%de corriente continua por motores de corriente alterna con variadores de
%velocidad en extrusoras de plástico"

%Kabir Bonilla Vega B31084

%Graficacion de las variables electricas y mecanicas de salida de la prueba
%de control del motor CA de 10 hp con control vectorial indirecto

clc
clear all

%Ejecución del archivo de Simulink
sim('motorCA10hp460Vcontrolvectorial','SimulationMode','Accelerator');

%Definición de variable de tiempo
t = (0:0.001:30)';

%Grafica de la velocidad
v_valor_deseado = ans.velocidad_deseada;
v_valor_medido = ans.velocidad_medida;
plot(t,v_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,v_valor_medido,'g')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad rotacional (rpm)')
legend('Velocidad deseada w*','Velocidad medida w')

%Grafica del torque
t_valor_deseado = ans.torque_deseado;
t_valor_medido = ans.torque_medido;
figure
plot(t,t_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,t_valor_medido,'g')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Torque desarrollado (Nm)')
legend('Torque de carga, TL','Torque de salida, Tout')

%Tensiones del motor

```

```

Va_valor_deseado = ans.Va_valor_deseado;
Va_valor_medido = ans.Va_valor_medido;
Vb_valor_deseado = ans.Vb_valor_deseado;
Vb_valor_medido = ans.Vb_valor_medido;
Vc_valor_deseado = ans.Vc_valor_deseado;
Vc_valor_medido = ans.Vc_valor_medido;

figure
tiledlayout(3,1)

nexttile
plot(t,Va_valor_deseado,'r')
hold on
plot(t,Va_valor_medido,'b')
grid on
title('Tensión fase A')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase A, Va*', 'Tensión medida fase A, Va')

nexttile
plot(t,Vb_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,Vb_valor_medido,'c')
grid on
title('Tensión fase B')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase B, Vb*', 'Tensión medida fase B, Vb')

nexttile
plot(t,Vc_valor_deseado,'g')
hold on
plot(t,Vc_valor_medido,'y')
grid on
title('Tensión fase C')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase C, Vc*', 'Tensión medida fase C, Vc')

%Corrientes del motor
Ia_valor_deseado = ans.Ia_valor_deseado;
Ia_valor_medido = ans.Ia_valor_medido;
Ib_valor_deseado = ans.Ib_valor_deseado;
Ib_valor_medido = ans.Ib_valor_medido;
Ic_valor_deseado = ans.Ic_valor_deseado;
Ic_valor_medido = ans.Ic_valor_medido;

figure
tiledlayout(3,1)

nexttile
plot(t,Ia_valor_deseado,'r')

```

```

hold on
plot(t,Ia_valor_medido,'b')
grid on
title('Corriente fase A')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada fase A, Ia*', 'Corriente medida fase A, Ia')

nexttile
plot(t,Ib_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,Ib_valor_medido,'c')
grid on
title('Corriente fase B')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada fase B, Ib*', 'Corriente medida fase B, Ib')

nexttile
plot(t,Ic_valor_deseado,'g')
hold on
plot(t,Ic_valor_medido,'y')
grid on
title('Corriente fase C')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada fase C, Ic*', 'Corriente medida fase C, Ic')

%Grafica de la corriente de eje directo
Id_valor_deseado = ans.Id_valor_deseado;
Id_valor_medido = ans.Id_valor_medido;
figure
plot(t,Id_valor_deseado,'r')
hold on
plot(t,Id_valor_medido,'b')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada eje directo, Id*', 'Corriente medida eje directo, Id')

%Grafica de la corriente de eje de cuadratura
Iq_valor_deseado = ans.Iq_valor_deseado;
Iq_valor_medido = ans.Iq_valor_medido;
figure
plot(t,Iq_valor_deseado,'r')
hold on
plot(t,Iq_valor_medido,'b')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada eje cuadratura, Iq*', 'Corriente medida eje cuadratura, Iq')

%Grafica de las tensiones de ejes directo y cuadratura
Vd_valor_deseado = ans.Vd_valor_deseado;

```

```
Vq_valor_deseado = ans.Vq_valor_deseado;
```

```
figure  
tiledlayout(2,1)
```

```
nexttile  
plot(t,Vd_valor_deseado,'r')  
grid on  
title('Tensión Eje directo')  
ylabel('Tensión (V)')  
legend('Tensión deseada eje directo, Vd*')
```

```
nexttile  
plot(t,Vq_valor_deseado,'b')  
grid on  
title('Tensión Eje Cuadratura')  
ylabel('Tensión (V)')  
xlabel('Tiempo (s)')  
legend('Tensión deseada eje cuadratura, Vq*')
```

AP.18 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas de control del motor CA de 10 hp con control V/Hz

```

%Universidad de Costa Rica
%Facultad de Ingeniería
%Escuela de Ingeniería Eléctrica

%Trabajo Final de Graduación: "Metodología para el reemplazo de motores
%de corriente continua por motores de corriente alterna con variadores de
%velocidad en extrusoras de plástico"

%Kabir Bonilla Vega B31084

%Graficacion de las variables electricas y mecanicas de salida de la prueba
%de control del motor CA de 10 hp con control escalar V/Hz sensorless

clc
clear all

%Ejecución del archivo de Simulink
sim('motorCA10hp460VcontrolVf','SimulationMode','Accelerator');

%Definición de variable de tiempo
t = (0:0.001:30)';

%Grafica de la velocidad
v_valor_deseado = ans.velocidad_deseada;
v_valor_medido = ans.velocidad_medida;
plot(t,v_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,v_valor_medido,'g')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad rotacional (rpm)')
legend('Velocidad deseada w*','Velocidad medida w')

%Grafica del torque
t_valor_deseado = ans.torque_deseado;
t_valor_medido = ans.torque_medido;
figure
plot(t,t_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,t_valor_medido,'g')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Torque desarrollado (Nm)')
legend('Torque de carga, TL','Torque de salida, Tout')

%Tensiones del motor

```

```

Va_valor_deseado = ans.Va_valor_deseado;
Va_valor_medido = ans.Va_valor_medido;
Vb_valor_deseado = ans.Vb_valor_deseado;
Vb_valor_medido = ans.Vb_valor_medido;
Vc_valor_deseado = ans.Vc_valor_deseado;
Vc_valor_medido = ans.Vc_valor_medido;

figure
tiledlayout(3,1)

nexttile
plot(t,Va_valor_deseado,'r')
hold on
plot(t,Va_valor_medido,'b')
grid on
title('Tensión fase A')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase A, Va*', 'Tensión deseada fase A, Va')

nexttile
plot(t,Vb_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,Vb_valor_medido,'c')
grid on
title('Tensión fase B')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase B, Vb*', 'Tensión deseada fase B, Vb')

nexttile
plot(t,Vc_valor_deseado,'g')
hold on
plot(t,Vc_valor_medido,'y')
grid on
title('Tensión fase C')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase C, Vc*', 'Tensión deseada fase C, Vc')

%Corrientes del motor
Ia_valor_medido = ans.Ia_valor_medido;
Ib_valor_medido = ans.Ib_valor_medido;
Ic_valor_medido = ans.Ic_valor_medido;

figure
tiledlayout(3,1)

nexttile
plot(t,Ia_valor_medido,'r')
grid on
title('Corriente fase A')
ylabel('Corriente (A)')

```

```
legend('Corriente fase A, Ia')

nexttile
plot(t,Ib_valor_medido,'m')
grid on
title('Corriente fase B')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente fase B, Ib')

nexttile
plot(t,Ic_valor_medido,'g')
grid on
title('Corriente fase C')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente fase C, Ic')
```

AP.19 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas de control del motor CA de 5 hp con control vectorial indirecto

```

%Universidad de Costa Rica
%Facultad de Ingeniería
%Escuela de Ingeniería Eléctrica

%Trabajo Final de Graduación: "Metodología para el reemplazo de motores
%de corriente continua por motores de corriente alterna con variadores de
%velocidad en extrusoras de plástico"

%Kabir Bonilla Vega B31084

%Graficacion de las variables electricas y mecanicas de salida de la prueba
%de control del motor CA de 5 hp con control vectorial indirecto

clc
clear all

%Ejecucion del archivo de Simulink
sim('motorCA5hp460Vcontrolvectorial','SimulationMode','Accelerator');

%Definición de variable de tiempo
t = (0:0.001:30)';

%Grafica de la velocidad
v_valor_deseado = ans.velocidad_deseada;
v_valor_medido = ans.velocidad_medida;
plot(t,v_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,v_valor_medido,'g')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad rotacional (rpm)')
legend('Velocidad deseada w*','Velocidad medida w')

%Grafica del torque
t_valor_deseado = ans.torque_deseado;
t_valor_medido = ans.torque_medido;
figure
plot(t,t_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,t_valor_medido,'g')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Torque desarrollado (Nm)')
legend('Torque de carga, TL','Torque desarrollado, Tout')

%Tensiones del motor

```

```

Va_valor_deseado = ans.Va_valor_deseado;
Va_valor_medido = ans.Va_valor_medido;
Vb_valor_deseado = ans.Vb_valor_deseado;
Vb_valor_medido = ans.Vb_valor_medido;
Vc_valor_deseado = ans.Vc_valor_deseado;
Vc_valor_medido = ans.Vc_valor_medido;

figure
tiledlayout(3,1)

nexttile
plot(t,Va_valor_deseado,'r')
hold on
plot(t,Va_valor_medido,'b')
grid on
title('Tensión fase A')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase A, Va*', 'Tensión medida fase A, Va')

nexttile
plot(t,Vb_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,Vb_valor_medido,'c')
grid on
title('Tensión fase B')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase B, Vb*', 'Tensión medida fase B, Vb')

nexttile
plot(t,Vc_valor_deseado,'g')
hold on
plot(t,Vc_valor_medido,'y')
grid on
title('Tensión fase C')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase C, Vc*', 'Tensión medida fase C, Vc')

%Corrientes del motor
Ia_valor_deseado = ans.Ia_valor_deseado;
Ia_valor_medido = ans.Ia_valor_medido;
Ib_valor_deseado = ans.Ib_valor_deseado;
Ib_valor_medido = ans.Ib_valor_medido;
Ic_valor_deseado = ans.Ic_valor_deseado;
Ic_valor_medido = ans.Ic_valor_medido;

figure
tiledlayout(3,1)

nexttile
plot(t,Ia_valor_deseado,'r')

```

```

hold on
plot(t,Ia_valor_medido,'b')
grid on
title('Corriente fase A')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada fase A, Ia*','Corriente medida fase A, Ia')

nexttile
plot(t,Ib_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,Ib_valor_medido,'c')
grid on
title('Corriente fase B')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada fase B, Ib*','Corriente medida fase B, Ib')

nexttile
plot(t,Ic_valor_deseado,'g')
hold on
plot(t,Ic_valor_medido,'y')
grid on
title('Corriente fase C')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada fase C, Ic*','Corriente medida fase C, Ic')

%Grafica de la corriente de eje directo
Id_valor_deseado = ans.Id_valor_deseado;
Id_valor_medido = ans.Id_valor_medido;
figure
plot(t,Id_valor_deseado,'r')
hold on
plot(t,Id_valor_medido,'b')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada eje directo, Id*','Corriente medida eje directo, Id')

%Grafica de la corriente de eje de cuadratura
Iq_valor_deseado = ans.Iq_valor_deseado;
Iq_valor_medido = ans.Iq_valor_medido;
figure
plot(t,Iq_valor_deseado,'r')
hold on
plot(t,Iq_valor_medido,'b')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada eje cuadratura, Iq*','Corriente medida eje cuadratura, Iq')

%Grafica de las tensiones de ejes directo y cuadratura
Vd_valor_deseado = ans.Vd_valor_deseado;

```

```
Vq_valor_deseado = ans.Vq_valor_deseado;
```

```
figure  
tiledlayout(2,1)
```

```
nexttile  
plot(t,Vd_valor_deseado,'r')  
grid on  
title('Tensión Eje directo')  
ylabel('Tensión (V)')  
legend('Tensión deseada eje directo, Vd*')
```

```
nexttile  
plot(t,Vq_valor_deseado,'b')  
grid on  
title('Tensión Eje Cuadratura')  
ylabel('Tensión (V)')  
xlabel('Tiempo (s)')  
legend('Tensión deseada eje cuadratura, Vq*')
```

AP.20 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas de control del motor CA de 5 hp con control V/Hz

```

%Universidad de Costa Rica
%Facultad de Ingeniería
%Escuela de Ingeniería Eléctrica

%Trabajo Final de Graduación: "Metodología para el reemplazo de motores
%de corriente continua por motores de corriente alterna con variadores de
%velocidad en extrusoras de plástico"

%Kabir Bonilla Vega B31084

%Graficacion de las variables electricas y mecanicas de salida de la prueba
%de control del motor CA de 5 hp con control escalar V/Hz sensorless

clc
clear all

%Ejecución del archivo de Simulink
sim('motorCA5hp460VcontrolVf','SimulationMode','Accelerator');

%Definición de variable de tiempo
t = (0:0.001:30)';

%Grafica de la velocidad
v_valor_deseado = ans.velocidad_deseada;
v_valor_medido = ans.velocidad_medida;
plot(t,v_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,v_valor_medido,'g')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad rotacional (rpm)')
legend('Velocidad deseada w*','Velocidad medida w')

%Grafica del torque
t_valor_deseado = ans.torque_deseado;
t_valor_medido = ans.torque_medido;
figure
plot(t,t_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,t_valor_medido,'g')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Torque desarrollado (Nm)')
legend('Torque de carga, TL','Torque de salida, Tout')

%Tensiones del motor

```

```

Va_valor_deseado = ans.Va_valor_deseado;
Va_valor_medido = ans.Va_valor_medido;
Vb_valor_deseado = ans.Vb_valor_deseado;
Vb_valor_medido = ans.Vb_valor_medido;
Vc_valor_deseado = ans.Vc_valor_deseado;
Vc_valor_medido = ans.Vc_valor_medido;

figure
tiledlayout(3,1)

nexttile
plot(t,Va_valor_deseado,'r')
hold on
plot(t,Va_valor_medido,'b')
grid on
title('Tensión fase A')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase A, Va*', 'Tensión deseada fase A, Va')

nexttile
plot(t,Vb_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,Vb_valor_medido,'c')
grid on
title('Tensión fase B')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase B, Vb*', 'Tensión deseada fase B, Vb')

nexttile
plot(t,Vc_valor_deseado,'g')
hold on
plot(t,Vc_valor_medido,'y')
grid on
title('Tensión fase C')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase C, Vc*', 'Tensión deseada fase C, Vc')

%Corrientes del motor
Ia_valor_medido = ans.Ia_valor_medido;
Ib_valor_medido = ans.Ib_valor_medido;
Ic_valor_medido = ans.Ic_valor_medido;

figure
tiledlayout(3,1)

nexttile
plot(t,Ia_valor_medido,'r')
grid on
title('Corriente fase A')
ylabel('Corriente (A)')

```

```
legend('Corriente fase A, Ia')

nexttile
plot(t,Ib_valor_medido,'m')
grid on
title('Corriente fase B')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente fase B, Ib')

nexttile
plot(t,Ic_valor_medido,'g')
grid on
title('Corriente fase C')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente fase C, Ic')
```

AP.21 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas de control del motor CA de 20 hp con control vectorial indirecto

```

%Universidad de Costa Rica
%Facultad de Ingeniería
%Escuela de Ingeniería Eléctrica

%Trabajo Final de Graduación: "Metodología para el reemplazo de motores
%de corriente continua por motores de corriente alterna con variadores de
%velocidad en extrusoras de plástico"

%Kabir Bonilla Vega B31084

%Graficacion de las variables electricas y mecanicas de salida de la prueba
%de control del motor CA de 20 hp con control vectorial indirecto

clc
clear all

%Ejecución del archivo de Simulink
sim('motorCA20hp460Vcontrolvectorial','SimulationMode','Accelerator');

%Definición de variable de tiempo
t = (0:0.001:30)';

%Grafica de la velocidad
v_valor_deseado = ans.velocidad_deseada;
v_valor_medido = ans.velocidad_medida;
plot(t,v_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,v_valor_medido,'g')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad rotacional (rpm)')
legend('Velocidad deseada w*','Velocidad medida w')

%Grafica del torque
t_valor_deseado = ans.torque_deseado;
t_valor_medido = ans.torque_medido;
figure
plot(t,t_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,t_valor_medido,'g')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Torque desarrollado (Nm)')
legend('Torque de carga, TL','Torque de salida, Tout')

%Tensiones del motor

```

```

Va_valor_deseado = ans.Va_valor_deseado;
Va_valor_medido = ans.Va_valor_medido;
Vb_valor_deseado = ans.Vb_valor_deseado;
Vb_valor_medido = ans.Vb_valor_medido;
Vc_valor_deseado = ans.Vc_valor_deseado;
Vc_valor_medido = ans.Vc_valor_medido;

figure
tiledlayout(3,1)

nexttile
plot(t,Va_valor_deseado,'r')
hold on
plot(t,Va_valor_medido,'b')
grid on
title('Tensión fase A')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase A, Va*', 'Tensión medida fase A, Va')

nexttile
plot(t,Vb_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,Vb_valor_medido,'c')
grid on
title('Tensión fase B')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase B, Vb*', 'Tensión medida fase B, Vb')

nexttile
plot(t,Vc_valor_deseado,'g')
hold on
plot(t,Vc_valor_medido,'y')
grid on
title('Tensión fase C')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase C, Vc*', 'Tensión medida fase C, Vc')

%Corrientes del motor
Ia_valor_deseado = ans.Ia_valor_deseado;
Ia_valor_medido = ans.Ia_valor_medido;
Ib_valor_deseado = ans.Ib_valor_deseado;
Ib_valor_medido = ans.Ib_valor_medido;
Ic_valor_deseado = ans.Ic_valor_deseado;
Ic_valor_medido = ans.Ic_valor_medido;

figure
tiledlayout(3,1)

nexttile
plot(t,Ia_valor_deseado,'r')

```

```

hold on
plot(t,Ia_valor_medido,'b')
grid on
title('Corriente fase A')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada fase A, Ia*', 'Corriente medida fase A, Ia')

nexttile
plot(t,Ib_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,Ib_valor_medido,'c')
grid on
title('Corriente fase B')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada fase B, Ib*', 'Corriente medida fase B, Ib')

nexttile
plot(t,Ic_valor_deseado,'g')
hold on
plot(t,Ic_valor_medido,'y')
grid on
title('Corriente fase C')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada fase C, Ic*', 'Corriente medida fase C, Ic')

%Grafica de la corriente de eje directo
Id_valor_deseado = ans.Id_valor_deseado;
Id_valor_medido = ans.Id_valor_medido;
figure
plot(t,Id_valor_deseado,'r')
hold on
plot(t,Id_valor_medido,'b')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada eje directo, Id*', 'Corriente medida eje directo, Id')

%Grafica de la corriente de eje de cuadratura
Iq_valor_deseado = ans.Iq_valor_deseado;
Iq_valor_medido = ans.Iq_valor_medido;
figure
plot(t,Iq_valor_deseado,'r')
hold on
plot(t,Iq_valor_medido,'b')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente deseada eje cuadratura, Iq*', 'Corriente medida eje cuadratura, Iq')

%Grafica de las tensiones de ejes directo y cuadratura
Vd_valor_deseado = ans.Vd_valor_deseado;

```

```
Vq_valor_deseado = ans.Vq_valor_deseado;
```

```
figure  
tiledlayout(2,1)
```

```
nexttile  
plot(t,Vd_valor_deseado,'r')  
grid on  
title('Tensión Eje directo')  
ylabel('Tensión (V)')  
legend('Tensión deseada eje directo, Vd*')
```

```
nexttile  
plot(t,Vq_valor_deseado,'b')  
grid on  
title('Tensión Eje Cuadratura')  
ylabel('Tensión (V)')  
xlabel('Tiempo (s)')  
legend('Tensión deseada eje cuadratura, Vq*')
```

AP.22 Código de MATLAB® utilizado para generar las curvas de control del motor CA de 20 hp con control V/Hz

```

%Universidad de Costa Rica
%Facultad de Ingeniería
%Escuela de Ingeniería Eléctrica

%Trabajo Final de Graduación: "Metodología para el reemplazo de motores
%de corriente continua por motores de corriente alterna con variadores de
%velocidad en extrusoras de plástico"

%Kabir Bonilla Vega B31084

%Graficacion de las variables electricas y mecanicas de salida de la prueba
%de control del motor CA de 20 hp con control escalar V/Hz sensorless

clc
clear all

%Ejecución del archivo de Simulink
sim('motorCA20hp460VcontrolVf','SimulationMode','Accelerator');

%Definición de variable de tiempo
t = (0:0.001:30)';

%Grafica de la velocidad
v_valor_deseado = ans.velocidad_deseada;
v_valor_medido = ans.velocidad_medida;
plot(t,v_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,v_valor_medido,'g')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad rotacional (rpm)')
legend('Velocidad deseada w*','Velocidad medida w')

%Grafica del torque
t_valor_deseado = ans.torque_deseado;
t_valor_medido = ans.torque_medido;
figure
plot(t,t_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,t_valor_medido,'g')
grid on
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Torque desarrollado (Nm)')
legend('Torque de carga, TL','Torque de salida, Tout')

%Tensiones del motor

```

```

Va_valor_deseado = ans.Va_valor_deseado;
Va_valor_medido = ans.Va_valor_medido;
Vb_valor_deseado = ans.Vb_valor_deseado;
Vb_valor_medido = ans.Vb_valor_medido;
Vc_valor_deseado = ans.Vc_valor_deseado;
Vc_valor_medido = ans.Vc_valor_medido;

figure
tiledlayout(3,1)

nexttile
plot(t,Va_valor_deseado,'r')
hold on
plot(t,Va_valor_medido,'b')
grid on
title('Tensión fase A')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase A, Va*', 'Tensión deseada fase A, Va')

nexttile
plot(t,Vb_valor_deseado,'m')
hold on
plot(t,Vb_valor_medido,'c')
grid on
title('Tensión fase B')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase B, Vb*', 'Tensión deseada fase B, Vb')

nexttile
plot(t,Vc_valor_deseado,'g')
hold on
plot(t,Vc_valor_medido,'y')
grid on
title('Tensión fase C')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
legend('Tensión deseada fase C, Vc*', 'Tensión deseada fase C, Vc')

%Corrientes del motor
Ia_valor_medido = ans.Ia_valor_medido;
Ib_valor_medido = ans.Ib_valor_medido;
Ic_valor_medido = ans.Ic_valor_medido;

figure
tiledlayout(3,1)

nexttile
plot(t,Ia_valor_medido,'r')
grid on
title('Corriente fase A')
ylabel('Corriente (A)')

```

```
legend('Corriente medida fase A, Ia')

nexttile
plot(t,Ib_valor_medido,'m')
grid on
title('Corriente fase B')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente medida fase B, Ib')

nexttile
plot(t,Ic_valor_medido,'g')
grid on
title('Corriente fase C')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente medida fase C, Ic')
```

ANEXOS

En esta sección se incluyen algunos datos sobre los aspectos mecánicos que se deben considerar a la hora de realizar la sustitución de los equipos de CC por los de CA, especialmente en lo que a acoples mecánicos y enseramientos se refiere.

AN.1 Tipos de acoples mecánicos

Algunos acoples que poseen material flexible son el acople de boquilla (“jaw”), el de mango (“sleeve”), el acople neumático, el de rejilla y el de diafragma (Holtz, s.f.).

- Acople de boquilla (“jaw”): es un tipo de acople que transmite el torque a través de la compresión de un inserto elastomérico ubicado entre dos boquillas entrelazadas. Generalmente el material elastomérico se fabrica de poliuretano o bronce, se puede adaptar a algún tipo de desalineamiento, ya sea angular o axial, y también puede funcionar como amortiguador torsional, especialmente ante vibraciones, y por lo general se utilizan en aplicaciones que requieren un bajo par de operación. En la figura AN.1, se muestra un acople de boquilla.



Figura AN.1: Acople de boquilla o “jaw” (Holtz, s.f.).

- Acople de manguito (“sleeve”): este acople transmite torques de cantidades pequeñas o medianas, entre los equipos conectados a través de un inserto elastomérico con ranuras macho que se acoplan con las ranuras del acople hembra. El material del inserto es EPDM, neopreno o Hytrel. El inserto puede ser de una sola pieza o de dos piezas. Este acople permite una desalineación moderada, y también brinda una pequeña amortiguación torsional. Se utiliza en aplicaciones de uso general. En la figura AN.2 se muestra un acople de este tipo.



Figura AN.2: Acople de manguito ("sleeve") (Holtz, s.f.)

- Acople de llanta ("tire"): estos acoples tienen un elemento de caucho o poliuretano entre los dos acoples. El elemento flexible es el encargado de transmitir el par. Este acople reduce la transmisión de cargas de impacto o vibraciones, además de que permite una mayor capacidad de desalineación entre los ejes de la carga y el motor. Es un acople fácil de montar. Permite operar al motor con velocidades moderadas a altas y se puede utilizar en una amplia gama de capacidades de par. En la figura AN.3 se muestra un acople de llanta.



Figura AN.3: Acople de llanta (Holtz, s.f.)

- Acople de disco: el acople de disco basa su funcionamiento en que el par se transmite a través de elementos de disco flexibles. Estos elementos se comprimen y se tensan con cuerdas en un círculo de pernos común atornillado alternativamente entre el lado impulsor y el impulsado. Los acoples de disco se componen de dos acoples, dos paquetes de discos flexibles y un miembro central. Un paquete de un disco puede adaptarse a la desalineación angular y axial; se requieren dos para adaptarse a la desalineación paralela. Este acople se utiliza principalmente para aplicaciones de alta velocidad. En la figura AN.4 se muestra un acople de este tipo.



Figura AN.4: Acople de disco (Holtz, s.f.)

- Acople de diafragma: Estos acoples utilizan una sola o una serie de placas o diafragmas para los miembros flexibles. Transmite torque desde el diámetro exterior de una placa flexible al diámetro interior, a través de un carrete o pieza espaciadora, y luego desde el diámetro interior hacia el exterior. Si se da una deflexión entre los diámetros interior y exterior, es porque existe una desalineación, tal como un desplazamiento axial. Este es el tipo de acople más flexible, ya que permite cualquier tipo de desalineación, y se puede utilizar en aplicaciones de alto par y alta velocidad. En la figura AN.5 se muestra un acople de diafragma.



Figura AN.5: Acople de diafragma (Holtz, s.f.)

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, el otro grupo de acoples son los acoples de flexibilidad mecánica. Estos acoples aceptan desalineaciones por desbalanceo, balanceo o deslizamiento de superficies metálicas. Todos los acoples de flexibilidad mecánica siempre requieren de lubricación. Entre los acoples de este tipo están los acoples de engranajes, los de rejillas y los de cadenas de rodillos (Holtz, s.f.).

- Acople de engranaje: Estos acoples son los que transmiten la mayor cantidad de par posible, de entre todos los engranajes que son flexibles. Estos acoples consisten de dos piezas con dientes de engranajes externos. Los discos se engranan con dos manguitos de rebordes ranurados internamente que se atornillan entre sí. Estos acoples se adaptan a las desalineaciones angulares y axiales mediante el desbalanceo y deslizamiento de los dientes del engranaje coronado contra los dientes del manguito de acoplamiento. La desalineación paralela se soluciona al tener dos puntos de flexión adyacentes de disco/manguito. Estos acoples requieren una lubricación periódica según sea la aplicación que se les esté dando. Son sensibles a las fallas de lubricación, pero cuando se les da la instalación y el mantenimiento apropiados, estos acoples pueden durar entre 3 a 5 años, o incluso décadas. En la figura AN.6 se muestra un acople de engranaje.



Figura AN.6: Acople de engranajes (Holtz, s.f.).

- Acople de rejillas (“grid”): Consisten en 2 piezas ranuradas radialmente que engranan con una tira serpentina de acero para resortes. La rejilla proporciona la amortiguación torsional y la flexibilidad de un elastómero, pero la resistencia del acero. Los acoplamientos de rejilla transmiten el par y se adaptan a la desalineación angular, paralela y axial de un acople al otro a través del balanceo y deslizamiento de una rejilla cónica en las ranuras de la pieza de acoplamiento. La sección transversal de la rejilla generalmente es cónica para un mejor contacto del cubo y un montaje más fácil. Como hay movimiento entre el acople de contacto y las piezas metálicas de la rejilla, se requiere lubricación. En la figura AN.7, se muestran un acople de este tipo.



Figura AN.7: Acople de rejilla (Holtz, s.f.).

- Acople de cadena de rodillos: Los acoplamientos tipo cadena de rodillos constan de dos acoples dentados radiales que enganchan una hebra de cadena de rodillos de doble paso. Los acoplamientos de cadena se utilizan para aplicaciones de par y velocidad de bajo a moderado. El engranaje de los dientes de la rueda dentada y la cadena transmite el par y las holguras asociadas acomodan la desalineación angular, paralela y axial. Los acoplamientos de cadena requieren lubricación periódica según la aplicación. Por lo general, la lubricación se aplica con brocha a la cadena y se usa una cubierta para ayudar a mantener la lubricación en el acoplamiento. En la figura AN.8 se muestra un acople de cadena de rodillos.



Figura AN.8: Acople de cadena (Holtz, s.f.).

AN.2 Encerramientos para motores eléctricos

Tabla AN.1: Encerramiento típicos para motores de CC y CA, según el estándar NEMA (Edvard, 2013).

| Tipo de Encerramiento | Características | Usos | Ejemplo |
|--|---|--|---|
| Prueba de goteo abierto (“Open Drip Proof”), ODP | Permite que el aire circule a través de los devanados para enfriarlo, pero evita que caigan gotas de líquido dentro del motor dentro de un ángulo de 15 grados desde la vertical. | Normalmente se utiliza para aplicaciones en interiores en lugares relativamente limpios y secos. |  |
| Totalmente encerrado enfriado por ventilador (“Totally Enclosed Fan Cooled”), TEFC | Evita el libre intercambio de aire entre el interior y el exterior del marco, pero no hace que el marco sea completamente hermético. Un ventilador está conectado al eje y empuja aire sobre el marco durante su funcionamiento para ayudar en el proceso de enfriamiento. El marco acanalado está diseñado para aumentar la superficie con fines de refrigeración. | El encerramiento estilo TEFC es el más versátil de todos. Se utiliza en bombas, ventiladores, compresores, transmisión por correa industrial en general y equipos de conexión directa. |  |
| Encerramiento completo sin ventilación (“Totally Enclosed Non-Ventilated”), TENV | Similar a un TEFC, pero no tiene ventilador de enfriamiento y se basa en la convención para enfriar. Sin aberturas de ventilación, herméticamente cerrado para evitar el | Estos son adecuados para usos que están expuestos a suciedad o humedad, pero no lugares muy húmedos o peligrosos (explosivos). |  |

| | | | |
|--|---|--|---|
| | libre intercambio de aire, pero no hermético. | | |
| Totalmente encerrado montado sobre aire (“Totally Enclosed Air Over”), TEAO | Ventilador hermético al polvo y motores de servicio de soplador diseñados para ventiladores montados en eje o ventiladores accionados por correa. El motor debe montarse dentro del flujo de aire del ventilador. | Uso en ventiladores y sopladores |  |
| Encerramiento total con capacidad de lavado (“Totally Enclosed Wash Down”), TEWD | Diseñado para soportar lavados a alta presión u otros ambientes húmedos o de alta humedad. Disponible en carcasas TEAO, TEFC y ENV | Motores para entornos hostiles y severos totalmente cerrados; diseñado para usarse en ambientes extremadamente húmedos o químicos, pero no para ubicaciones peligrosas. |  |
| Encerramientos a prueba de explosión (“Explosion-Proof Enclosures”), EXPL | El motor a prueba de explosión es una máquina totalmente cerrada y está diseñado para resistir una explosión de gas o vapor especificado dentro de la carcasa del motor y evitar la ignición fuera del motor por chispas, parpadeo o explosión. | Estos motores están diseñados para propósitos peligrosos específicos, como atmósferas que contienen gases o polvos peligrosos. Para un funcionamiento seguro, la temperatura máxima de funcionamiento del motor debe estar por debajo de la temperatura de ignición de los gases o vapores circundantes. |  |

| | | | |
|--|--|---|---|
| <p>Ubicaciones Peligrosas (“Hazardous Locations”), HAZ</p> | <p>Las aplicaciones de motores para lugares peligrosos se clasifican según el tipo de entorno peligroso presente, las características del material específico que crea el peligro, la probabilidad de exposición al medio ambiente y el nivel máximo de temperatura que se considera seguro para la sustancia que crea el peligro.</p> | <p>El formato utilizado para definir esta información es una estructura de código de clase, grupo, división y temperatura según lo define el Código Eléctrico Nacional (NFPA-70).</p> |  |
|--|--|---|---|

AN.3 Montajes y posición del motor

